

**ANÁLISIS DE COLAPSOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA**

VÍCTOR DANIEL HERNÁNDEZ RAMÍREZ
cc. 1.088.009.494

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2015

**ANÁLISIS DE COLAPSOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA**

VÍCTOR DANIEL HERNÁNDEZ RAMÍREZ
cc. 1.088.009.494

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE TECNÓLOGO
EN ELECTRICIDAD**

Director:
PhD Antonio Escobar Zuluaga
Docente Escuela de Tecnología Eléctrica

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2015

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Pereira, Julio de 2015

DEDICATORIA

A Dios....

Este trabajo de grado lo dedico a Dios, mi ayuda e inspiración para luchar por esta hermosa profesión, mi refugio en los momentos que fueron difíciles y mi compañero en los triunfos de mi vida. Sin su apoyo no hubiese tenido el suficiente valor para completar todos los logros requeridos por esta carrera, hubiese desistido, y es por eso que en este, el logro más grande hasta ahora alcanzado en mi vida, se lo dedico a él.

AGRADECIMIENTOS

A la primera persona que quiero agradecer es a mi padre, Álvaro, él siempre fue mi modelo a seguir, un hombre sabio e inteligente, a él le debo todos mis estudios y mi formación, le debo la persona que soy ahora; le agradezco por inspirar en mi tan bonita profesión, por apoyarme y por la ayuda que me brindó a lo largo de la carrera, porque él también fue como un profesor; en segundo lugar a mi madre, Luz, que siempre es la luz de mi vida, la que más me motivaba cuando estaba aburrido, la persona a la que también le debo todos los logros, porque también son de ella; le agradezco a mi madre por todo el apoyo y la motivación que me ha brindado a lo largo de esta carrera, por creer en mí siempre.

Quiero agradecer también a mi tío Martín, por enseñarme gran parte de esta profesión, por enseñarme a trabajar y por enseñarme a ser responsable.

A mis profesores, muchas gracias por haberme enseñado todo lo relacionado con esta profesión, por enseñarme que se puede llegar más adelante de lo planeado y que el camino educativo, a pesar de las dificultades, es un camino grato.

Agradezco a todas las personas cercanas, que con su apoyo y compañía de alguna manera me ayudaron con este logro, que era la primera gran meta de mi vida, a mi familia, a mi novia y a mis amigos, el día a día nos hace quienes somos, y hoy soy lo que soy, también por ustedes.

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTOS	5
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	17
1.1. JUSTIFICACIÓN	18
1.2. OBJETIVOS	19
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	19
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
CAPÍTULO II: DEFINICIONES GENERALES	20
2.1. CARGABILIDAD EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	20
2.1.1. Límite térmico	20
2.1.2. Límite por cargabilidad	22
2.2. ESTUDIO DEL FLUJO DE CARGA	23
2.3. MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON	26
2.4. CONTINGENCIA	29
2.5. ESTRATEGIAS DE SEGURIDAD	30
2.5.1. División del sistema o <i>Active Splitting</i>	31
2.5.2. Deslastre de carga o <i>Load Shedding</i>	31
2.5.3. Racionamiento técnico	31
CAPÍTULO III: COLAPSOS	33
3.1. COLAPSO (BLACKOUT O APAGÓN)	33
3.1.1. Colapso de tensión	33
3.1.2. Colapso por sobrepaso del límite de cargabilidad	35
3.1.3. Efecto en cascada	35

3.2. RESEÑAS DE LOS CASOS DE COLAPSO A NIVEL MUNDIAL.....	36
3.3. RESEÑA DE LOS 10 PEORES APAGONES ELÉCTRICOS EN 50 AÑOS.....	45
CAPÍTULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS	46
4.1. CASO BASE.....	46
4.2. PRUEBAS DE CONTINGENCIA N-1	50
4.2.1. Pruebas en las líneas de transmisión	50
4.2.2. Pruebas en las cargas.....	90
4.2.3. Pruebas en los generadores	106
4.3. SOLUCIONES PARA LOS CASOS DE CONTINGENCIAS MÁS CRÍTICAS	132
4.3.1. Solución a las contingencias en líneas de transmisión.....	133
4.3.2. Solución a las contingencias en las cargas.....	135
4.3.3. Solución a las contingencias en los generadores.....	137
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	139
BIBLIOGRAFÍA.....	140

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Reseña de los apagones a nivel mundial. [15]	36
Tabla 2.....	47
Tabla 3. Datos de líneas.	47
Tabla 4. Datos de generadores.	48
Tabla 5. Datos de cargas	48
Tabla 6. Datos de barras.....	48
Tabla 7. Desconexión de la línea 1-2.....	51
Tabla 8. Salida de operación de la línea 1-3.	51
Tabla 9. Salida de operación de la línea 7-5.	52
Tabla 10. Salida de operación de la línea 2-6.	52
Tabla 11. Salida de operación de la línea 8-6.	53
Tabla 12. Desconexión de la línea 1-3.....	54
Tabla 13. Salida de operación de la línea 2-5.	55
Tabla 14. Salida de operación de la línea 7-5.	56
Tabla 15. Salida de operación de la línea 4-5.	56
Tabla 16. Salida de operación de la línea 2-3.	57
Tabla 17. Salida de operación de la línea 2-4.	57
Tabla 18. Salida de operación de la línea 2-6.	58
Tabla 19. Salida de operación de la línea 8-6.	58
Tabla 20. Desconexión de la línea 1-8.....	59
Tabla 21. Tensiones con la salida de la línea 1-8.....	60

Tabla 22. Desconexión de la línea 2-3.....	60
Tabla 23. Tensiones con la salida de la línea 2-3.....	61
Tabla 24. Desconexión de la línea 2-4.....	62
Tabla 25. Salida de operación de la línea 2-5.	62
Tabla 26. Salida de operación de la línea 7-5.	63
Tabla 27. Salida de operación de la línea 4-5.	63
Tabla 28. Cargas del sistema.....	64
Tabla 29. Desconexión de la línea 2-5.....	65
Tabla 30. Salida de operación de la línea 7-5.	66
Tabla 31. Salida de operación de la línea 4-5.	66
Tabla 32. Cargas del sistema.....	67
Tabla 33. Desconexión de la línea 2-6.....	68
Tabla 34. Salida de operación de la línea 2-5.	69
Tabla 35. Salida de operación de la línea 4-5.	69
Tabla 36. Salida de operación de la línea 7-5.	70
Tabla 37. Cargas del sistema.....	70
Tabla 38. Desconexión de la línea 3-4.....	71
Tabla 39. Tensiones con la salida de la línea 3-4.....	72
Tabla 40. Desconexión de la línea 4-5.....	73
Tabla 41. Salida de operación de la línea 2-5.	73
Tabla 42. Salida de operación de la línea 7-5.	74
Tabla 43. Cargas del sistema.....	74
Tabla 44. Desconexión de la línea 7-5.....	76
Tabla 45. Salida de operación de la línea 2-5.	76

Tabla 46. Salida de operación de la línea 4-5.	77
Tabla 47. Cargas del sistema.....	77
Tabla 48. Desconexión de la línea 6-7.	79
Tabla 49. salida de operación de la línea 2-5	79
Tabla 50. salida de operación de la línea 7-5	80
Tabla 51. Salida de operación de la línea 4-5.	80
Tabla 52. Cargas del sistema.....	81
Tabla 53. Desconexión de la línea 8-6.	82
Tabla 54. Salida de operación de la línea 8-1.	82
Tabla 55. Desconexión de la línea 6-10.	84
Tabla 56. Tensiones con la desconexión de la línea 6-10.	84
Tabla 57. Desconexión de la línea 10-7.	85
Tabla 58. Tensiones con la desconexión de la línea 10-7.	85
Tabla 59. Desconexión de la línea 8-9.	86
Tabla 60. Tensiones cuando se desconecta la línea 8-9.	86
Tabla 61. Desconexión de la línea 9-10	87
Tabla 62. Salida de operación de la línea 2-5.	88
Tabla 63. Salida de operación de la línea 7-5.	88
Tabla 64. Salida de operación de la línea 4-5.	89
Tabla 65. Cargas del sistema.....	89
Tabla 66. Desconexión de la carga 2.	90
Tabla 67. Sobrecarga en la línea 2-5.	91
Tabla 68. Salida de operación de la línea 2-5.	92
Tabla 69. Salida de operación de la línea 7-5.	92

Tabla 70. Salida de operación de la línea 4-5.	93
Tabla 71. Cargas del sistema.....	93
Tabla 72. Desconexión de la carga 3.	94
Tabla 73. Generación del sistema.	94
Tabla 74. Desconexión de la carga 4.	95
Tabla 75. Generación del sistema	95
Tabla 76. Desconexión de la carga 5.	96
Tabla 77. Generación del sistema.	96
Tabla 78. Cargas del sistema.....	96
Tabla 79. Sobrecarga de la línea 2-5.....	97
Tabla 80. Salida de operación de la línea 2-5.	98
Tabla 81. Salida de operación de la línea 7-5.	98
Tabla 82. Salida de operación de la línea 4-5.	99
Tabla 83. Cargas del sistema.....	99
Tabla 84. Desconexión de la carga 7.	100
Tabla 85. Sobrecarga en la línea 7-5.....	101
Tabla 86. Salida de operación de la línea 7-5.	102
Tabla 87.salida de operación de la línea 2-5.	102
Tabla 88. Salida de operación de la línea 4-5.	103
Tabla 89. Salida de operación de la línea 10-7.	103
Tabla 90.salida de operación de la línea 6-7.	104
Tabla 91. Cargas del sistema.....	104
Tabla 92. Desconexión de la carga 10.	105
Tabla 93. Generación del sistema.	106

Tabla 94. Desconexión del generador 1.....	106
Tabla 95. Sobrecarga en la línea 2-5.....	107
Tabla 96. Salida de operación de la línea 2-5.	108
Tabla 97. Salida de operación de la línea 7-5.	108
Tabla 98. Salida de operación de la línea 4-5.	109
Tabla 99. Cargas del sistema.....	109
Tabla 100. Desconexión del generador 2.....	110
Tabla 101. Sobrecarga en la línea 7-5.....	111
Tabla 102. Salida de operación de la línea 7-5.	112
Tabla 103. Salida de operación de la línea 2-5.	112
Tabla 104. Salida de operación de la línea 4-5.	113
Tabla 105. Cargas del sistema.....	113
Tabla 106. Desconexión del generador 4.	114
Tabla 107. Sobrecarga en las líneas 2-5 y 7-5.	115
Tabla 108. Salida de operación de la línea 2-5.	116
Tabla 109. Salida de operación de la línea 7-5.	116
Tabla 110. Salida de operación de la línea 4-5.	117
Tabla 111. Cargas del sistema.....	117
Tabla 112. Desconexión del generador 7.....	118
Tabla 113. Sobrecarga en las líneas 2-5 y 10-7.	119
Tabla 114. Salida de operación de la línea 2-5	120
Tabla 115. Salida de operación de la línea 4-5.	120
Tabla 116. Salida de operación de la línea 10-7.	121
Tabla 117. Salida de operación de la línea 6-7.	121

Tabla 118. Cargas del sistema.....	122
Tabla 119. Desconexión del generador 8.....	123
Tabla 120. Sobrecarga en la línea 7-5.....	124
Tabla 121. Salida de operación de la línea 7-5.	124
Tabla 122. Salida de operación de la línea 2-5	125
Tabla 123. Salida de operación de la línea 4-5.	125
Tabla 124. Salida de operación de la línea 8-9.	126
Tabla 125. Salida de operación de la línea 6-10.	126
Tabla 126. Tensiones en el blackout.	127
Tabla 127. Desconexión del generador 9.....	128
Tabla 128. Desconexión del generador 10.....	128
Tabla 129. Sobrecarga en la línea 2-5.....	129
Tabla 130. Salida de operación de la línea 2-5.	130
Tabla 131. Salida de operación de la línea 7-5.	130
Tabla 132. Salida de operación de línea 4-5.	131
Tabla 133. Cargas del sistema.....	131
Tabla 134. Fallas críticas en los elementos del sistema.	132

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Corriente Vs. Temperatura ambiente	21
Ilustración 2. Corriente Vs. Velocidad del viento.....	21
Ilustración 3. Corriente Vs. Ángulo del viento.	22
Ilustración 4. Flujo de potencia.....	23
Ilustración 5. Sistema eléctrico de 4 nodos.....	25
Ilustración 6. Pérdida de una línea de transmisión por caída de una torre.....	29
Ilustración 7. Diagrama del esquema de seguridad basado en la división activa y control de frecuencia de carga (Deslastre de Carga).....	31
Ilustración 8. Blackout en la ciudad de Buenos Aires, Argentina.	33
Ilustración 9. Subestación eléctrica.....	35
Ilustración 10. Los 10 Blackouts más severos.	45
Ilustración 11. Sistema eléctrico B10 Reserve en estado estable.	46
Ilustración 12. Contorno de tensiones en el caso base.	49
Ilustración 13. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 1-2.	50
Ilustración 14. Contorno de tensiones en el blackout ocasionado por la línea 1-2.	53
Ilustración 15. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 1-3.	55
Ilustración 16. Contorno de tensiones en el blackout ocasionado por la línea 1-3.	59
Ilustración 17. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 2-4.	61
Ilustración 18. Contorno de tensiones en el active Splitting ocasionado por la línea 2-4.....	64
Ilustración 19. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 2-5.	65
Ilustración 20. Contorno de tensiones en el active Splitting de la línea 2-5.	67

Ilustración 21. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 2-6.	68
Ilustración 22. Contorno de tensiones en el active Spliting ocasionado por la línea 2-6.....	71
Ilustración 23. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 4-5.	72
Ilustración 24. Contorno de tensiones en el active Spliting ocasionado por la línea 4-5.....	75
Ilustración 25. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 7-5.	75
Ilustración 26. Contorno de tensiones en el active Spliting ocasionado por la línea 7-5.....	78
Ilustración 27. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 6-7.	78
Ilustración 28. Contorno de tensiones en el active Spliting ocasionado por la línea 6-7.....	81
Ilustración 29. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 8-6.	82
Ilustración 30. Contorno de tensiones en el blackout ocasionado por l línea 8-6.....	83
Ilustración 31. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 9-10.	87
Ilustración 32. Contorno de tensiones en el active Spliting ocasionado por la línea 9-10...	90
Ilustración 33. Contorno de tensiones con la desconexión de la carga 2.....	90
Ilustración 34. Contorno de tensiones en el active Spliting ocasionado por la carga 2.	94
Ilustración 35. Contorno de tensiones con la desconexión de la carga 6.....	97
Ilustración 36. Contorno de tensiones en el active Spliting ocasionado por la carga 6.	100
Ilustración 37. Contorno de tensiones con la desconexión de la carga 7.....	101
Ilustración 38. Contorno de tensiones en el active Spliting ocasionado por la carga 7.	105
Ilustración 39. Contorno de tensiones con la desconexión del generador 1.	106
Ilustración 40. Contorno de tensiones en el active Spliting provocado por el generador 1.	110
Ilustración 41. Contorno de tensiones con la desconexión del generador 2.	111
Ilustración 42. Contorno de tensiones en el active Spliting ocasionado por el generador 2.	114
Ilustración 43. Contorno de tensiones con la desconexión de generador 4.	115

Ilustración 44. Contorno de tensiones en el active Spliting ocasionador por el generador 4.	118
Ilustración 45. Contorno de tensiones con la desconexión del generador 7.	119
Ilustración 46. Contorno de tensiones en el active Spliting ocasionado por el generador 7.	122
Ilustración 47. Contorno de tensiones con al desconexión del generador 8.	123
Ilustración 48. Contorno de tensiones en el blackout ocasionado por el generador 8.	127
Ilustración 49. Contorno de tensiones con la desconexión del generador 10.	129
Ilustración 50. Contorno de tensiones en el active Spliting ocasionado por el generador 10.	132
Ilustración 51. Fallas críticas presentadas por los elementos del sistema en el análisis de contingencias n-1.	133
Ilustración 52. Fallas críticas del sistema que desconectan el nodo 5.	136

CAPÍTULO I:

INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia se han convertido en el principal medio de suministro de energía eléctrica para las grandes ciudades, comercios y grandes industrias, evidenciando su importancia en la sociedad actual y su necesidad para el desarrollo, industrial, comercial y social. Los grandes avances realizados en la humanidad desde la electrificación y la interconexión eléctrica han demostrado la importancia que los sistemas de potencia tienen en la sociedad actual, y la dependencia de ellos; por lo tanto, se deben asegurar las condiciones y requerimientos que garanticen alta confiabilidad en el servicio, es decir, un suministro de energía prácticamente ininterrumpido.

Debido al funcionamiento dinámico de los sistemas eléctricos de potencia se pueden presentar diferentes anomalías como desconexiones de líneas, desconexiones de cargas y desconexiones de generadores o transformadores; ocasionando un estado crítico como el colapso del sistema (*blackout* o apagón) o el funcionamiento dividido del mismo (*active Splitting*).

Los colapsos por sobrepaso del límite de potencia son comunes en los sistemas eléctricos, ya que la ausencia de un elemento del sistema puede ocasionar la salida de elementos adicionales y desencadenar un efecto en cascada, es decir, la salida de varias componentes en un orden característico.

Mediante el proyecto de grado, se realizará un análisis de colapso por sobrepaso del límite de potencia de las líneas de transmisión en el sistema de potencia *B10 Reserve*, mediante el software computacional *powerworld*.

El sistema eléctrico de potencia B10 Reserve será analizado con el software computacional *Powerworld* [1], para realizar las tareas de planificación y análisis del sistema en estado de contingencia **n-1** para identificar los elementos críticos del mismo y tratar de brindar una oportuna solución desde la primera contingencia, haciendo uso de las siguientes opciones: re-despacho de generación, racionamiento técnico o salida de líneas o generadores del sistema.

Entre los trabajos previos consultados para este trabajo se encuentran: un estudio como se plantea también en el proyecto de grado de [2], con más enfoque a lo planteado por [3] y [4], a nivel institucional también se han presentado análisis de contingencias y colapsos cómo [5] y en la ciudad de Pereira se realizó el estudio [6]. A nivel de Latinoamérica podemos encontrar estudios como [7], y fuera de nuestro continente se han realizado estudios de mayor nivel como se plantea en [8].

1.1. JUSTIFICACIÓN

Debido a que el funcionamiento de los sistemas eléctricos de potencia tiene un comportamiento dinámico, las condiciones de funcionamiento deben ser establecidas aplicando criterios de funcionamiento muy estrictos para evitar los problemas de estabilidad dinámica, que pueden llevar al sistema al estado de colapso. En estos estados de emergencia se producen apagones que dejan a gran cantidad de consumidores sin el suministro de energía eléctrica, necesaria para el normal funcionamiento de la vida moderna, y el sistema requiere la restauración de cargas. Otros estados de emergencia menos críticos pueden llevar al sistema al colapso de tensión. En este fenómeno, partes del sistema eléctrico sufren caídas de tensión que afectan el funcionamiento de los artefactos eléctricos conectados a la red, lo que significa que la calidad del suministro eléctrico es deficiente.

Los sistemas eléctricos se resaltan por la trascendencia que tienen en la sociedad; y la necesidad del consumo de energía eléctrica en los sectores industriales, comerciales y locales. La realización del proyecto está orientada a los estudios de los sistemas eléctricos de potencia y los diferentes sucesos que ocurren en operación, teniendo en cuenta lo fundamental que es identificar los elementos críticos para el sistema, de este modo poder dar soluciones que encaminen a un sistema eléctrico mucho más robusto.

Evidenciando los procesos que se llevan a cabo para que el suministro eléctrico sea cada día más confiable y pueda garantizar la satisfacción de la demanda energética de la población, se considera necesaria la tarea del análisis de los sistemas de potencia y el establecimiento de los protocolos de operación en diferentes circunstancias para brindar soluciones oportunas a eventos inesperados que pueden ocurrir en la operación continua de estos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis de colapsos en el sistema eléctrico B10 Reserve.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar los valores de tensiones y potencia del sistema en estado normal.
- Identificar los elementos críticos para el funcionamiento del sistema.
- Seleccionar cuáles de los elementos críticos del sistema eléctrico pueden ocasionar *active Splitting* y cuales pueden generar *blackout* con su desconexión.
- Plantear soluciones para que el sistema siga funcionando aún en la ausencia de los elementos que son críticos para él.

CAPÍTULO II:

DEFINICIONES GENERALES

2.1. CARGABILIDAD EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

“La determinación de límites de transferencia de energía eléctrica es una tarea fundamental para garantizar la seguridad de los sistemas de energía eléctrica. Existen diversas restricciones que limitan el flujo de energía eléctrica a través de líneas de transmisión. Desde el punto de vista físico, la máxima transferencia de energía por un conductor se obtiene mediante la determinación de la relación corriente-temperatura, llamada límite térmico. Sin embargo, existen otras restricciones que en muchos casos no permiten la operación de las líneas eléctricas con flujos de potencia cercanos a su límite térmico, tal es el caso de límites de cargabilidad.”

“Se aplican metodologías para calcular el límite de transferencia de potencia que garantice una operación segura tanto en condiciones de pre falla como ante contingencias. Se describen aspectos de interés para la determinación de flujos máximos de energía eléctrica a través de líneas de transmisión de redes eléctricas. Se establece el límite térmico de conductores eléctricos, la cargabilidad de líneas de transmisión y el límite de estabilidad ante oscilaciones inter área para un enlace del Sistema Interconectado”. [3]

2.1.1. Límite térmico

“El límite térmico de un conductor para líneas aéreas es la corriente máxima permitida, considerando una temperatura máxima a través del conductor para condiciones ambientales establecidas. El cálculo del límite térmico para líneas aéreas se obtiene mediante métodos de balance de calor. Para determinar el límite térmico de conductores aéreos desnudos es necesario considerar en el análisis el efecto de la temperatura ambiente, la velocidad y dirección del viento, la emisión solar y la altura sobre el nivel del mar”.

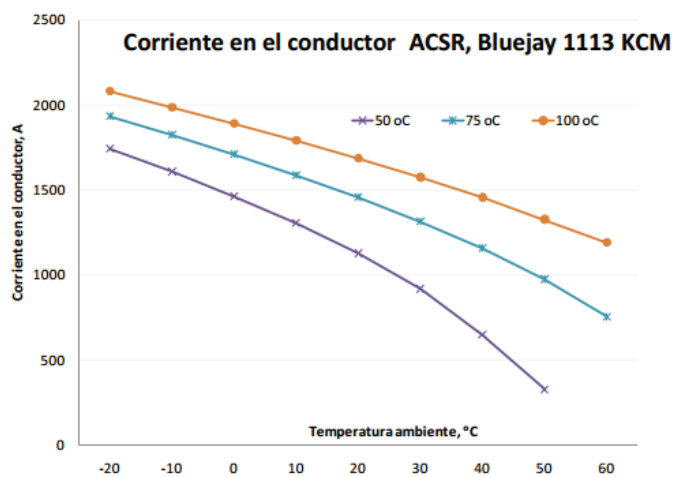
“En la actualidad, existen métodos tanto estáticos como dinámicos para determinar el límite térmico, la diferencia es que en el caso de los dinámicos algunas de las variables utilizadas en el cálculo se obtienen mediante mediciones en tiempo real (tensión, flecha, temperatura, corriente en el conductor) que se envían para ser procesadas en un centro de control”.

“Los conductores tipo ACSR (*Aluminum Conductor Steel Reinforced*) son los más utilizados a nivel mundial, estos conductores están diseñados para operar a una temperatura continua máxima de 100° C, sin embargo, normalmente se supone una temperatura total de 75° C debido a que su uso tiene un buen desempeño del conductor”.

“En general, las empresas eléctricas consideran en el análisis temperaturas de operación del conductor que van desde 50° C hasta 100° C. En las ilustraciones 1, 2 y 3 se muestra el comportamiento de la corriente a través de un conductor *Bluejay*, calibre 1113 KCM considerando las temperaturas de operación del conductor de 50° C, 75° C y 100° C ante variaciones de la temperatura ambiente, velocidad del viento, ángulo del viento y altura sobre nivel del mar”.

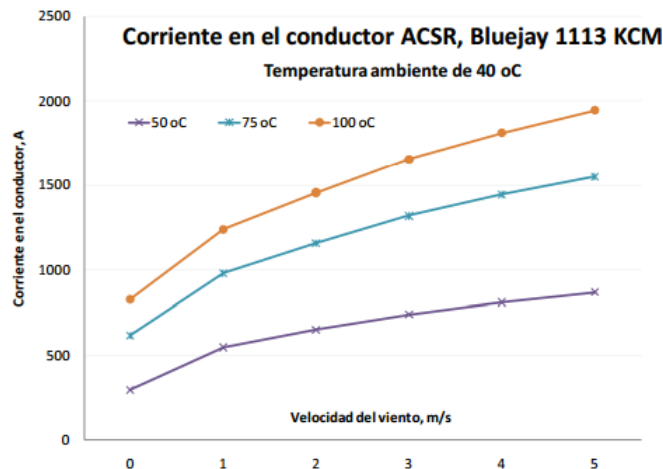
“A menos que se indique lo contrario, los valores considerados en el análisis son los siguientes: temperatura ambiente de 40° C, velocidad del viento de 2 m/s, ángulo del viento 45° C (con respecto al conductor) y una elevación de 1600 m sobre el nivel del mar”. [3]

Ilustración 1. Corriente Vs. Temperatura ambiente.



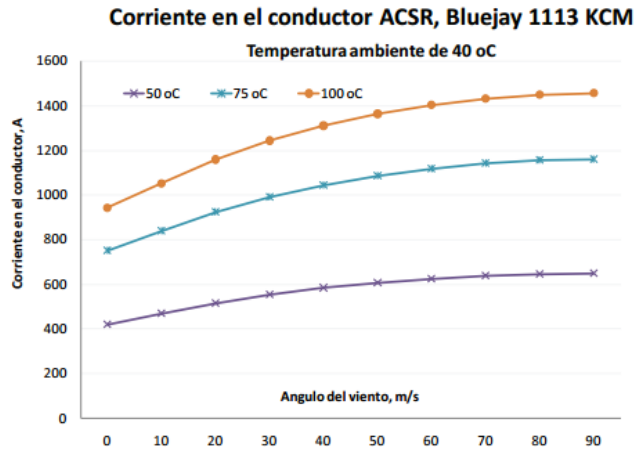
Fuente. [3]

Ilustración 2. Corriente Vs. Velocidad del viento.



Fuente. [3]

Ilustración 3. Corriente Vs. Ángulo del viento.



Fuente. [3]

2.1.2. Límite por cargabilidad

“La cargabilidad de una línea de transmisión indica la capacidad de potencia que puede fluir por la línea bajo condiciones de operación aceptables. La cargabilidad de la línea está en función del calibre y la longitud de la línea, para conocer su comportamiento se consideran condiciones óptimas de voltaje en ambos extremos de la misma, es decir, un voltaje de 1 p.u. tanto en el nodo de envío como en el de recepción, como se muestra en la ilustración 4”.

“La cargabilidad de una línea puede valorarse a partir de la relación del flujo de potencia real contra potencia reactiva (P-Q) a través de la línea eléctrica. Esta curva característica (P-Q) varía tanto por el flujo de potencia como por la longitud de la línea. La curva característica potencia real-potencia reactiva de una línea eléctrica indica que al incrementar su flujo de potencia real, aumenta la potencia reactiva que esta consume, lo que se manifiesta como pérdida de potencia en la reactancia inductiva en serie de la línea. El valor de la potencia real donde el requerimiento de potencia reactiva es cero se conoce como *SIL Surge Impedance Loading* o potencia natural de la línea. El valor del SIL depende tanto de la inductancia serie y la capacitancia en derivación como del nivel de tensión entre fases de la línea de transmisión, como se indica en la ecuación 2. Cuanto mayor es el nivel de tensión mayor es el SIL de la línea. De igual manera, el SIL aumenta al incrementar el número de conductores por fase de la línea, ya que, disminuye su impedancia característica”

Ecuación 1

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

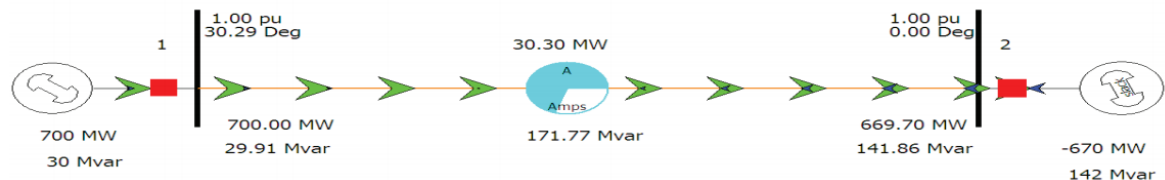
Ecuación 2

$$SIL = \frac{KV^2}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$$

“El comportamiento de la curva potencia real- potencia reactiva de la línea de transmisión se puede describir como sigue”:

- Para niveles de transferencia de potencia real menores al SIL, la potencia capacitiva producida por la línea es menor a la potencia inductiva que esta consume, bajo estas condiciones la línea aporta potencia reactiva capacitiva a la red eléctrica.
- Cuando el flujo de potencia real a través de la línea es igual al valor de su SIL, la potencia capacitiva producida por la línea es igual a la potencia inductiva que esta consume. Bajo esta condición de operación, la línea no inyecta, pero tampoco absorbe potencia reactiva de la red eléctrica.
- Finalmente, al aumentar el flujo de potencia real por la línea a valores superiores al SIL la potencia reactiva consumida por la línea es mayor a la potencia reactiva generada por la línea eléctrica, en este caso la línea demanda potencia reactiva de tipo inductiva que debe ser suministrada por otras fuentes del sistema eléctrico de potencia. [3]

Ilustración 4. Flujo de potencia.



Fuente. [3]

2.2. ESTUDIO DEL FLUJO DE CARGA

“El objetivo principal de un Sistema Eléctrico de Potencia es satisfacer la demanda. Como consecuencia surge el problema de por dónde debe hacerse la alimentación e incluso prevenir caídas de tensión, regulación de transformadores, inyección de potencia reactiva”.

“Los estudios de flujo de potencia, más normalmente llamados estudios de flujo de carga, son sumamente importantes para evaluar el funcionamiento de los sistemas de potencia, su control y planificación para expansiones futuras. Un estudio de flujo de potencia define principalmente las potencias activa y reactiva y el vector de tensión en cada bus en el sistema, aunque mucha información adicional estará disponible en la salida por impresora del ordenador del estudio de flujo de potencia típico”.

“Los principios en los estudios del flujo de potencia son fáciles, pero un estudio relativo a un sistema de la potencia real sólo se puede llevar a cabo con un ordenador digital.

Entonces la necesidad sistemática de cálculos numéricos requiere que se ejecuten por medio de un procedimiento iterativo; dos de los normalmente más usados son el método Gauss-Seidel y el método Newton-Raphson. Antes de considerar estos métodos numéricos, se ilustra el concepto del flujo de potencia para obtener las expresiones explícitas de la potencia que fluye en una línea corta de transmisión. Hay que reducir el número de posibilidades: Estudio de Flujo de Potencia”.

“Se precisa resolver un sistema que no es lineal ya que los valores de potencia proceden de dos factores, tensión e intensidad, y solo se conoce el producto. Basado en la filosofía de los sistemas lineales del análisis de nudos, hecho en la asignatura de Circuitos, se trata de utilizar herramientas de cálculo numérico que por procedimientos iterativos llegar a la solución”. [9]

- Método de Análisis nodal es el más empleado.
- Construir la Matriz de Admitancias de barras: $Y_{[BUS]}$.

Ecuación 3.

$$P_i - Q_i - V_i^* Y_{i1} V_1 - V_i^* Y_{i2} V_2 - \dots - V_i^* Y_{in} V_n = 0$$

$$\forall i=1, 2, \dots, n$$

- Ajustarse a los tipos de barras:

Tipo	Dato	Incógnita	Denominación
1	V , [V]	P, Q	Barra de referencia
2	P, V , Qmax, Qmin	Q, [V]	Barra de tensión controlada
3	P, Q V ,	[V]	Barra de carga

- Modelización de las líneas mediante su esquema en π

Matriz de la admitancia $Y_{[BUS]}$

“El sistema de cuatro bus que corresponde al diagrama unifilar de la ilustración estaría representado por la red. En cuanto a los voltajes de los nodos V1, V2, V3 y V4 y las admitancias dadas, por la ley de intensidades de Kirchhoff implica” [9]:

$$\begin{bmatrix} Y_{ii} & -Y_{ik} \\ -Y_{ki} & Y_{kk} \end{bmatrix}$$

Ecuación 4

$$I_1 = V_1 Y_{10} + (V_1 - V_2) Y_{12} + (V_1 - V_3) Y_{13}$$

Ecuación 5

$$I_2 = V_2 Y_{20} + (V_2 - V_1) Y_{12} + (V_2 - V_3) Y_{23} + (V_2 - V_4) Y_{24}$$

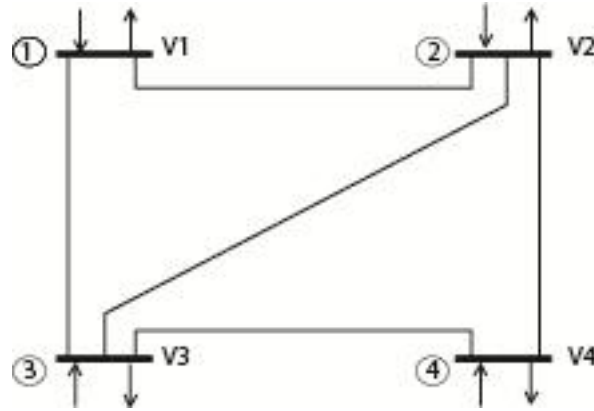
Ecuación 6

$$I_3 = V_3 \cdot Y_{30} + (V_3 - V_1) Y_{13} + (V_3 - V_2) Y_{23} + (V_3 - V_4) Y_{34},$$

Ecuación 7

$$I_4 = V_4 Y_{40} + (V_4 - V_2) Y_{24} + (V_4 - V_3) Y_{34}$$

Ilustración 5. Sistema eléctrico de 4 nodos.



Se re estructuran los elementos y se escriben en forma de matriz:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{10} + Y_{12} + Y_{13} & -Y_{12} & -Y_{13} & 0 \\ -Y_{12} & Y_{20} + Y_{12} + Y_{23} + Y_{24} & -Y_{23} & -Y_{24} \\ -Y_{13} & -Y_{23} & Y_{30} + Y_{13} + Y_{23} + Y_{34} & -Y_{34} \\ 0 & -Y_{24} & -Y_{34} & Y_{40} + Y_{24} + Y_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

Se re escribe la ecuación como:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$\begin{aligned} Y_{11} &= Y_{10} + Y_{12} + Y_{13} \\ Y_{22} &= Y_{20} + Y_{12} + Y_{23} + Y_{24} \\ Y_{33} &= Y_{30} + Y_{13} + Y_{23} + Y_{34} \\ Y_{44} &= Y_{40} + Y_{24} + Y_{34} \\ Y_{12} &= Y_{21} = -Y_{12} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Y_{13} &= Y_{31} = -Y_{13} \\
Y_{14} &= Y_{41} = -Y_{14} = 0 \\
Y_{23} &= Y_{32} = -Y_{23} \\
Y_{24} &= Y_{42} = -Y_{24} \\
Y_{34} &= Y_{43} = -Y_{34}
\end{aligned}$$

Cada admitancia Y_{ii} ($i = 1, 2, 3, 4$) se llama admitancia propia del nodo i y es igual a la suma algebraica de todas las admitancias que terminan en el nodo i . Cada término de la matriz triangular Y_{ik} ($i, k = 1, 2, 3, 4$) se llama la admitancia mutua (o admitancia de transferencia) entre nodos i y k y es igual a la suma cambiada de signo de todas las admitancias conectadas directamente entre esos nodos. Más allá, $Y_{ik} = Y_{ki}$. Para una red general con N nodos la ley de intensidades de Kirchhoff en cuanto a las tensiones de nodo se escribe como:

Ecuación 8
 $I = Y_{[BUS]} V$

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} ..$$

$Y_{[BUS]}$ se llama la matriz del bus de la admitancia, y V e I son las matrices del voltaje de nodo y matrices de intensidad nodo, respectivamente. El primer subíndice en cada Y indica el nodo al que la intensidad está expresado, y el segundo subíndice indica el nodo cuyo voltaje es responsable por un componente particular de la intensidad. Más allá, las admitancias a lo largo de los diagonales son las admitancias propias, y las admitancias del triangular son las admitancias mutuas. Se deduce que la intensidad que entra en un nodo k es:

Ecuación 9
 $I_k = \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n$

2.3. MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

En análisis numérico, el método de Newton (conocido también como el método de Newton-Raphson o el método de Newton-Fourier) es un algoritmo eficiente para encontrar aproximaciones de los ceros o raíces de una función real. También puede ser usado para encontrar el máximo o mínimo de una función, encontrando los ceros de su primera derivada. [10]

El método de Newton-Raphson es un método abierto, en el sentido de que no está garantizada su convergencia global. La única manera de alcanzar la convergencia es

seleccionar un valor inicial lo suficientemente cercano a la raíz buscada. Así, se ha de comenzar la iteración con un valor razonablemente cercano al cero (denominado punto de arranque o valor supuesto). La relativa cercanía del punto inicial a la raíz depende mucho de la naturaleza de la propia función; si ésta presenta múltiples puntos de inflexión o pendientes grandes en el entorno de la raíz, entonces las probabilidades de que el algoritmo diverja aumentan, lo cual exige seleccionar un valor supuesto cercano a la raíz. Una vez que se ha hecho esto, el método linealiza la función por la recta tangente en ese valor supuesto. La abscisa en el origen de dicha recta será, según el método, una mejor aproximación de la raíz que el valor anterior. Se realizarán sucesivas iteraciones hasta que el método haya convergido lo suficiente.

Sea $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ función derivable definida en el intervalo real $[a, b]$. Empezamos con un valor inicial x_0 y definimos para cada número natural n .

Ecuación 10

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}.$$

Donde f' denota la derivada de f .

Nótese que el método descrito es de aplicación exclusiva para funciones de una sola variable con forma analítica o implícita conocible. Existen variantes del método aplicables a sistemas discretos que permiten estimar las raíces de la tendencia, así como algoritmos que extienden el método de Newton a sistemas multivariantes, sistemas de ecuaciones, etc.

Tres son las formas principales por las que tradicionalmente se ha obtenido el algoritmo de Newton-Raphson.

La primera de ellas es una simple interpretación geométrica. En efecto, atendiendo al desarrollo geométrico del método de la secante, podría pensarse en que si los puntos de iteración están lo suficientemente cerca (a una distancia infinitesimal), entonces la secante se sustituye por la tangente a la curva en el punto. Así pues, si por un punto de iteración trazamos la tangente a la curva, por extensión con el método de la secante, el nuevo punto de iteración se tomará como la abscisa en el origen de la tangente (punto de corte de la tangente con el eje X). Esto es equivalente a linealizar la función, es decir, f se reemplaza por una recta tal que contiene al punto $(x_0, f(x_0))$ y cuya pendiente coincide con la derivada de la función en el punto, $f'(x_0)$. La nueva aproximación a la raíz, x_1 se logra de la intersección de la función lineal con el eje X de abscisas. Matemáticamente:

Ecuación 11

$$f'(x_n) = \frac{f(x_n)}{x_n - x_{n+1}}$$

Se puede ver que x_{n+1} es una mejor aproximación que x_n para el cero (x) de la función f .

Una forma alternativa de obtener el algoritmo es desarrollando la función $f(x)$ en serie de Taylor, para un entorno del punto x_n :

Ecuación 12

$$f(x) = f(x_n) + f'(x_n)(x - x_n) + (x - x_n)^2 \frac{f''(x_n)}{2!} + \dots$$

Si se trunca el desarrollo a partir del término de grado 2, y evaluamos en x_{n+1} :

Ecuación 13

$$f(x_{n+1}) = f(x_n) + f'(x_n)(x_{n+1} - x_n)$$

Si además se acepta que x_{n+1} tiende a la raíz, se ha de cumplir que $f(x_{n+1}) = 0$, luego, sustituyendo en la expresión anterior, obtenemos el algoritmo.

Finalmente, hay que indicar que el método de Newton-Raphson puede interpretarse como un método de iteración de punto fijo. Así, dada la ecuación

Ecuación 14

$$f(x) = 0$$

Se puede considerar el siguiente método de iteración de punto fijo:

Ecuación 15

$$g(x) = x + h(x)f(x)$$

Se escoge $h(x)$ de manera que $g'(r)=0$ (r es la raíz buscada). Dado que $g'(r)$ es:

Ecuación 16

$$g'(r) = 1 + h'(r)f(r) + h(r)f'(r) = 1 + h(r)f'(r)$$

Entonces:

Ecuación 17

$$h(r) = \frac{-1}{f'(r)}$$

Como $h(x)$ no tiene que ser única, se escoge de la forma más sencilla:

Ecuación 18

$$h(x) = \frac{-1}{f'(x)}$$

Por tanto, imponiendo subíndices:

Ecuación 19

$$g(x_n) = x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

Expresión que coincide con la del algoritmo de Newton-Raphson [10].

2.4. CONTINGENCIA

Ilustración 6. Pérdida de una línea de transmisión por caída de una torre.



Fuente. [11]

Parte importante en el análisis de seguridad de los sistemas eléctricos de potencia es el estudio de contingencias. Se puede definir una contingencia como el evento que ocurre cuando un elemento de la red es retirado o sale de servicio por causas imprevistas o programadas. En los análisis de contingencias se estudian los efectos sobre el sistema y su capacidad de permanecer en operación normal sin un elemento. También se analizan los problemas que estas salidas producen como por ejemplo: sobrecarga térmica, pérdida de carga, corrientes de cortocircuito excesivas, entre otras. [5]

Cada vez que se presenta la salida de un elemento en el sistema, las corrientes en las líneas se redistribuyen a través de la red y los voltajes de las barras cambian. Como consecuencia de esto, pueden aparecer sobrecargas en líneas o transformadores. En los estudios de

contingencias se consideran las salidas de: líneas de transmisión, transformadores, generadores y cargas. Las salidas de los elementos pueden ser programadas o ser forzadas por condiciones ambientales o fallas. De otro lado, la salida de un elemento puede dar origen a la salida de otros elementos, pudiéndose producir un efecto en cascada que eventualmente conduce al colapso del sistema. Cuando se realizan estudios de contingencias se puede considerar la salida de un elemento o la salida simultánea de varios. En este último caso, nos encontramos en un problema de contingencias múltiples. Independiente de si la contingencia es simple o múltiple se debe definir el nivel y el tipo de contingencia que vamos a manejar como aceptable para el sistema. Podemos considerar que el sistema debe poder operar normalmente ante una contingencia simple (salida de un elemento) y que ante una segunda contingencia o ante contingencias múltiples, el sistema opere en condiciones anormales. [5]

Los análisis en estado estable para contingencias se realizan generalmente resolviendo muchos flujos de carga sobre los sistemas. A través de estos se pueden conocer las condiciones de estado post-transitorio que el sistema adquiere después de la salida de cada elemento del sistema. [5]

Además, los estudios de contingencias deben ser acompañados por otros estudios, por ejemplo, de confiabilidad, con el fin de plantear soluciones técnicamente adecuadas y económicamente factibles. [5]

Por otro lado existen zonas que son más influenciadas que otras cuando se retira un elemento del sistema, y el efecto principal afecta a los elementos vecinos al elemento que salió de servicio. En la literatura especializada existen metodologías que muestran cómo la salida de un elemento sólo afecta a los elementos vecinos, pudiéndose hacer un equivalente del sistema sobre la zona influenciada. Además sobre la zona influenciada se aplican los índices de evaluación de contingencias para observar los casos más críticos en esta zona. En consecuencia, generalmente sólo se analizan las contingencias sobre la zona de influencia. Estas metodologías son computacionalmente más rápidas. [5]

2.5. ESTRATEGIAS DE SEGURIDAD

Los esquemas de seguridad de los sistemas eléctricos de potencia deben proteger las partes más importantes de la red y deben procurar mantener en operación la mayor parte del sistema eléctrico. La idea fundamental es reducir el impacto de los eventos cuando estos aparecen, estableciendo procedimientos que conduzcan al aislamiento de la falla y dejando fuera de servicio la menor cantidad de usuarios.

Existe un esquema de seguridad basado en dos estrategias que se combinan. La primera consiste en dividir el sistema en subsistemas (*Active Splitting*) y la segunda consiste en desconectar algunas cargas (*Load shedding*). El módulo de separación se basa en los conceptos de la teoría de grafos y la desconexión de carga se basa en esquemas automáticos de deslastre asociados a la frecuencia del sistema (*UFLS: under-frequency load shedding*).

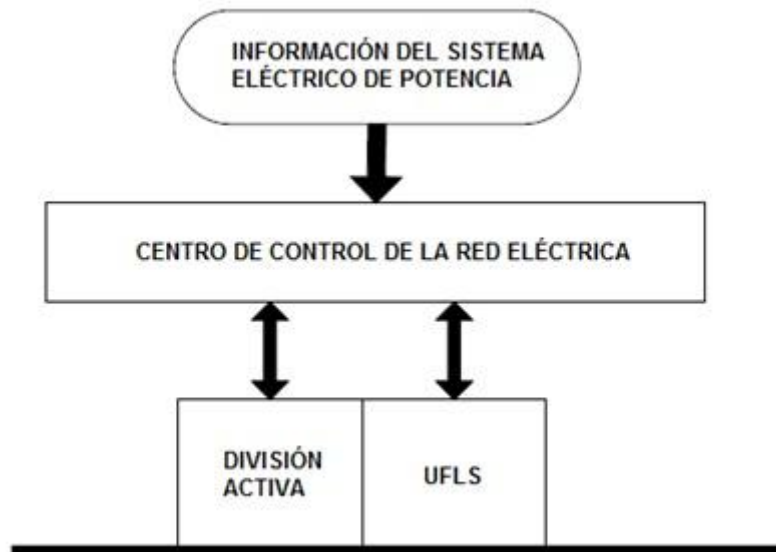
2.5.1. División del sistema o *Active Splitting*

En esta primera etapa el operador del sistema eléctrico de potencia puede aprovechar la capacidad de la red de dividirse en 2 o más subsistemas. Esta separación controlada permite separar la zona de falla y proteger el área principal de efectos en cascada, de esta forma se evita que una contingencia pueda dar origen a un colapso (*blackout*).

2.5.2. Deslaste de carga o *Load Shedding*

Las protecciones en un sistema eléctrico de potencia hacen parte de una estrategia diseñada para detectar condiciones críticas del sistema. Si una condición crítica es detectada, las protecciones actúan para contrarrestarla de manera controlada. Uno de los esquemas más comunes de protección está basado en la detección de baja frecuencia también denominado deslaste de carga (*UFLS*). La desconexión de carga (*Load shedding*) tiene como propósito reducir el desequilibrio entre generación y carga, de este modo se pueden restablecer las condiciones normales de funcionamiento y evitar desviaciones de frecuencia. Este esquema resulta muy efectivo y económico para restablecer el funcionamiento normal en situaciones de emergencia.

Ilustración 7. Diagrama del esquema de seguridad basado en la división activa y control de frecuencia de carga (Deslaste de Carga).



Fuente. [2]

2.5.3. Racionamiento técnico

Esta estrategia consiste en reducir la tensión de los nodos de carga del sistema que tienen un comportamiento tipo impedancia constante con el propósito de reducir el consumo del sistema. Por ejemplo, al disminuir la tensión de una carga de calefacción (hornos eléctricos de resistencia, hornillas eléctricas, bombillas incandescentes, etc) se reduce el consumo de

potencia y la corriente en la carga. De esta forma se disminuye el consumo sin retirar usuarios del servicio. A través de este procedimiento es posible mantener el sistema operando en condición normal cuando se presentan algunas perturbaciones. Esta estrategia no resulta útil en circuitos con carga tipo potencia constante ya que al reducir la tensión se puede incrementar la corriente del sistema produciendo un efecto contrario al deseado. Esto ocurre en sistemas con componentes importantes de cargas motorizadas. En la práctica, para implementar esta estrategia de seguridad, se manipulan los taps de los transformadores en las subestaciones eléctricas, de esta forma las cargas domiciliarias (resistivas) disminuyen su demanda de potencia.

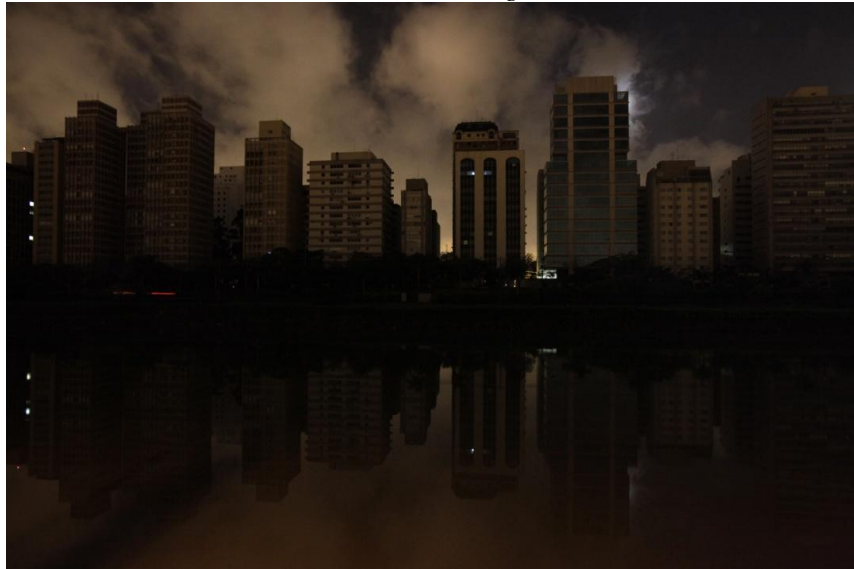
CAPÍTULO III:

COLAPSOS

3.1. COLAPSO (BLACKOUT O APAGÓN)

Las razones para la caída del suministro eléctrico están frecuentemente relacionadas al fallo de alguno de los elementos que componen el sistema eléctrico de potencia, por ejemplo: daños en una subestación eléctrica o en una línea de transmisión (accidental u ocasionada, como el caso de ataques terroristas).

Ilustración 8. Blackout en la ciudad de Buenos Aires, Argentina.



Fuente. [12]

Un colapso también puede ser producido por aumento del consumo energético de la carga, que tiene graves consecuencias si la red eléctrica no está preparada para dichos eventos.

Los apagones eléctricos son comunes en países en vía de desarrollo debido a que no cuentan con un sistema eléctrico de potencia eficiente por motivos de costo y financieros.

3.1.1. Colapso de tensión

Un colapso de tensión es un fenómeno más complejo que la inestabilidad local de tensión, y poco frecuente. Se produce como resultado de una secuencia de eventos, acompañados de un problema de inestabilidad de tensión, que provocan un perfil bajo de tensiones en una parte extensa del sistema eléctrico. Los transformadores con cambio de tomas, y las cargas

de climatización asociadas a termostatos, pueden jugar un papel importante en un colapso de tensión. [13]

Una secuencia típica de sucesos que pueden desembocar en un colapso de tensión es la siguiente: [13]

- El sistema se encuentra con varias unidades generadoras cercanas a los puntos de consumo fuera de funcionamiento. Como consecuencia, algunas líneas de transporte están muy cargadas y quedan pocas reservas de potencia reactiva.
- El desencadenante del colapso de tensión es la pérdida de una línea cargada, lo que provoca una carga adicional en las líneas adyacentes y un mayor consumo de reactiva.
- Inmediatamente desciende la tensión en los centros de consumo, y en consecuencia desciende también la carga. Esto tiene un efecto beneficioso sobre la estabilidad de tensión. Por otro lado, el control automático de tensión en los generadores incrementa la excitación y la aportación de reactiva, para recuperar la tensión en sus terminales. Esto genera un flujo adicional de reactiva por los transformadores y líneas de los generadores, con la correspondiente caída de tensión. En este punto es probable que los generadores se encuentren cerca de su límite de funcionamiento térmico, tanto por la corriente en el devanado de campo como por la del inducido.
- Las líneas de distribución responden a la bajada de tensión cambiando la toma de los transformadores reguladores, de forma que en 2-4 minutos se recupera la tensión y la carga. Esto provoca más flujo por las líneas, mayor caída de tensión en la red de transporte y más demanda de reactiva a los generadores. En un margen de tiempo más amplio, las cargas resistivas asociadas a termostatos comienzan a recuperarse al detectar un descenso de temperatura.
- Uno a uno, los generadores van alcanzando su límite de aporte de reactiva, establecido por la máxima corriente admisible en el devanado de campo. Cuando este límite se alcanza en un generador, la tensión en sus terminales desciende. Esto provoca un incremento de la corriente en el devanado inducido, y un límite adicional de la potencia reactiva para que no se caliente el devanado inducido. La parte de reactiva que deja de producir se trasfiere a otros generadores, agravando su situación. Además, conforme desciende la tensión, las baterías de condensadores en paralelo repartidas por el sistema son menos eficientes.

- El proceso puede provocar una caída amplia y generalizada de tensión. En esta situación puede perderse el sincronismo entre generadores, y llegar a un apagón más o menos extenso.

3.1.2. Colapso por sobrepaso del límite de cargabilidad

Este tipo de colapsos se presenta cuando la cargabilidad de las líneas de transmisión y transformadores es sobrepasada, es decir, el flujo de potencia a través de estos elementos es mayor a la capacidad nominal. Cuando ocurre uno de estos sucesos, si se trata de una línea de transmisión, si el flujo de potencia es mayor a la cargabilidad de la línea la protección correspondiente opere, pero si al correr el flujo de carga el operador del sistema observa que la sobrecarga en dicha línea es de un porcentaje bajo y sería una perturbación mayor sacar la línea de operación, es conveniente mantener la línea dentro del sistema. Si la sobrecarga ocurre en un transformador, lo más recomendado es sacar el equipo de operación, ya que por cuestiones técnicas, es decir si el transformador se llegase a averiar es más difícil reemplazarlo.

Ilustración 9. Subestación eléctrica.



Fuente. [14]

3.1.3. Efecto en cascada

Los colapsos son eventos que ocurren como consecuencia del efecto en cascada de una contingencia, es decir, empieza por contingencia de un elemento del sistema de potencia, que cuando opera su protección o sale del sistema, lleva a contingencia a uno o más elementos del sistema, provocando un efecto seguido de pérdida de elementos del sistema y un colapso total del mismo (blackout) o un funcionamiento aislado o dividido (active Spliting)

3.2. RESEÑAS DE LOS CASOS DE COLAPSO A NIVEL MUNDIAL

En el cuadro 1 se hace una reseña de los apagones que han ocurrido a nivel mundial, mencionando los lugares, fechas y causas de dichos sucesos.

Tabla 1. Reseña de los apagones a nivel mundial. [15]

Fecha	Causa	Afectados	Ubicación	Duración
Diciembre de 2013 - Enero de 2014	Debido a una poderosa ola de calor, se registró un uso histórico de aires acondicionados en el conurbano bonaerense, lo que generó que miles de vecinos pasaron Navidad y año nuevo a oscuras, causando protestas en contra de las medidas políticas sobre el uso energético.		Provincia de Buenos Aires	Varias semanas
23 de marzo de 2009	Unos 84 países en total se unieron y cortaron la luz por el cambio climático que sufre el mundo.	84 Países	Mundial	1 hora
27 de marzo de 2010	El apagón de una hora, fue realizado en contra del cambio climático que está sufriendo el planeta, fue el tercer apagón mundial contra el cambio climático, contando al del 2007 de 5 minutos y en el 2009 de una hora, igual a este. El primer país en realizar el apagón fue Nueva Zelanda.	Aproximadamente 4000 ciudades en unos 120 países	Mundial	1 hora (de las 21:30 a las 22:30 hora local)
1 de febrero de 2007	El objetivo era protestar contra el "Cambio climático". La propuesta fue lanzada por Greenpeace y aceptada por gran parte de la población mundial. Una gran cantidad de gobiernos	72 organizaciones	Mundial	5 minutos

	se fueron sumando a la propuesta			
4 de mayo-7 de mayo	El apagón que se originó a las 15:30 horas fue causado por una falla en la subestación eléctrica de 20 de Julio en dicho municipio, de la empresa local Electricaribe. La falla afectó a los barrios noroccidente y suroccidente de Soledad y suroccidente de Barranquilla, tras el apagón se suspendió el agua potable.	El 55% del territorio de Soledad, el 30% del territorio de Barranquilla	Soledad.	70 horas
10 de noviembre de 2009	El problema se originó en una subestación eléctrica de la central Represa de Itaipú, situada en la ciudad de Foz do Iguaçu, Paraná, debido a la disminución de una línea de transmisión por una tormenta.	Fueron afectadas un total de 18 estados brasileños, junto a un 90% del territorio paraguayo.	Brasil y Paraguay	Media hora
14 de agosto del 2003	Esta interrupción de 63 GW de energía, fue a causa de la poca inversión que dio Estados Unidos a la electricidad.	8 estados de Estados Unidos y 2 provincias de Canadá, un total de 50 millones de personas.	Estados Unidos y Canadá	2 horas
9 de noviembre de 1965	Ocurrió a causa de un colapso en la red eléctrica que une la costa entre Estados Unidos y Canadá, los sistemas de protección de la red eléctrica	30 millones de personas, en 8 estados.	Estados Unidos	14 horas

	fallaron.			
03 de septiembre	El apagón que se originó a las 12:30 fue causado por una falla en la línea de alta tensión de 765 KW, la falla se pudo originar por una sobrecarga eléctrica en dicha línea, o por el retiro ilegal de una malla de protección de un tramo de dicha línea.	60% del territorio nacional	Estados Zulia, Lara, Miranda, Mérida, Trujillo, Táchira, Carabobo, Apure, Vargas, Barinas, Falcon, Yaracuy, Cojedes, Aragua y la ciudad de Caracas.	Entre 3 y 5 horas
29 de abril de 2008	El apagón fue por un incendio forestal cerca de la estación hidroeléctrica del embalse de Guri, que es la más importante del país, ya que ella distribuye la electricidad a todo el territorio, lo que llevó a un corto circuito en las líneas eléctricas. También los incendios forestales provocaron la caída de algunas torres de alta tensión.	La mitad del territorio venezolano, un 40%	Venezuela: Mérida, Lara, Zulia, Falcón, Bolívar, Táchira y Sucre y Caracas, entre otros	3 horas
9 de mayo de 2000	Fue a causa de un corto circuito, que fue provocado cuando una cigüeña construyó un nido arriba de y una torre de alta tensión, provocando así el corto circuito entre los hilos conductores.	2 millones de usuarios.	Portugal	Más de una hora
26 de noviembre de 2009	Se dio por una falla en el tendido eléctrico, lo que trajo un masivo corte de electricidad en el norte de la provincia, también por la ruptura de un transformador.	200.000 personas	Argentina: Provincias de Salta y Jujuy	12 horas

25 de febrero	El apagón fue causado por la quema de herbazales registrada en el Ingenio Santa Rosa, este evento provocó que se partieran la línea de transmisión de la subestación, sobrecargando las plantas que en su momento estaban generando, las cuales comenzaron a colapsar una por una.	Más del 90% del territorio nacional	Panamá	5 horas
13 al 14 de julio de 1977	Fue a causa de una tormenta eléctrica que terminó destruyendo un transformador.	10 millones de personas.	Estados Unidos	25 horas
18 de marzo de 2008	Este apagón fue a causa de los fuertes vientos de 100 kilómetros por hora, la caída de árboles sobre las líneas eléctricas cortó el suministro eléctrico.	Un total de 330.000 usuarios	Monterrey y San Nicolás	1 día
8 de septiembre	Pasadas de las 3:30, un corte de luz se originó en Arizona que afectó parte de Baja California y Estados Unidos (Mexicali, Arizona, San Diego, Tijuana y Ensenada). El apagón se produjo por una falla en la planta de luz de Arizona. La falla también afectó el suministro de agua.	Un 92% o 3.5 millones de personas se vieron afectadas	Mexicali	Entre 7 y 6 horas
12 de septiembre de 2005	Fue porque un trabajador cortó una importante línea eléctrica, y al volver a conectarla, se activó el sistema automático preventivo, el cual actuó cuando esta línea se corta, este sistema genera una serie de apagones en el resto de los generadores de la	130.000 de clientes	Los Ángeles, California	Una hora y media

	zona			
23 de octubre de 2006	Fue por un corto circuito en una torre de luz, provocado por el choque de un globo aerostático, durante la celebración del cumpleaños del alcalde Gustavo Sierra Ortiz.	500.000 de personas	En los distritos de Lince, Miraflores, San Isidro y Surquillo (en un 90% de su territorio) y Barranco, La Victoria, San Borja y San Luis (en un 20%), Perú.	1 hora
20 de julio de 1976	Fue causado por los militares durante el Proceso de Reorganización Nacional, las fuerzas armadas provocaron el apagón para poder capturar estudiantes, sindicalistas o personas involucradas con pensamientos de izquierda, o con la guerrilla.	Todo el partido de Ledesma .	Partido de Ledesma, Argentina	7 días
28 de septiembre de 2003	Se debió a la caída de un árbol sobre una línea eléctrica en Suiza, este país le importa energía a Italia, lo que ocasionó la pérdida de energía a aquel país también.	56 millones de personas.	Italia	3 horas
18 de agosto de 2005	Todo se produjo debido a una falla en la línea que va desde Cilegon a Saguling, esto se produjo alrededor de las 10:23.	100 millones de personas.	Indonesia	5 horas

31 de julio	El 31 de julio de julio 2012 se produce en la India unos de los más grandes apagones de la historia mundial, cuando se produjo una gran falla que dejó a medio país sin electricidad. Esto afectó a cientos de trenes, cientos de miles de hogares y otros establecimientos como la red que conecta estaciones de generación con los clientes se derrumbó por segunda vez en dos días.	670 millones	India	Entre dos días
13 de marzo de 1989	Este apagón fue algo peculiar, ya que fue a causa de una tormenta solar.	6 millones de personas.	Canadá	9 horas
12 de julio de 2004	El apagón fue causado por un problema en la línea de alta tensión que suministra energía al sur de Grecia, desde la central eléctrica de Ptolemaida.	7 millones de personas	Sur de Grecia	Más de una hora
5 de diciembre	El apagón fue causado por una avería en una subestación de alta tensión compartida por Endesa y Red Eléctrica Española, situada en el Barranco de Tirajana, que se produjo sobre las 9:00. El incidente fue rápidamente solucionado y los últimos afectados recuperaron la luz pasadas las 11:00.	Unos 200.000 clientes en toda la isla, aproximadamente un 45% del total.	Gran Canaria	Entre 15 minutos y 2 horas (se fue reestableciendo paulatinamente)
4 de octubre de 2006	El origen del problema se presentó en Alemania, en el estado de Renania del Norte Westfalia, el apagón se produjo por una reacción en cadena que afectó a parte	5 millones	Europa Occidental y otros países	30 minutos

	de Francia, Bélgica, Holanda, Italia, España y Portugal.			
6 de febrero de 2010	Fue por las grandes nevadas que azotaron a ese país (en algunos lugares las nevadas llegaron a los 70 centímetros), se llegó a declarar "estado de emergencia".	200.000 personas se quedaron sin electricidad	Estados Unidos	3 días
24 de abril de 2007	Costa Rica ya había declarado el estado de emergencia nacional, al tener constantes apagones eléctricos por desabastecimiento energético. Una de las razones principales de este hecho, fue que los ríos en los que cruzaban las represas hidroeléctricas se habían secado, a la vez de este hecho, tres plantas térmicas tenían fallas	Gran parte del país.	Costa Rica	46 minutos
26 de abril de 2007	La falla se presentó cuando uno de los interruptores de la subestación Torca en el norte de Bogotá donde llegan las líneas de alta tensión, no se abrió correctamente lo que desencadenó un efecto dominó de apagón en todo el país.	El 92% del territorio, un total de 25 millones de personas.	Colombia	3 horas
27 de febrero de 2010	Fue producido por un fuerte terremoto.	13 millones, el 80% de la población chilena	Chile	Entre 30 minutos y 2 semanas

24 de septiembre de 2011	<p>Pasadas las 20.30 horas, un abrupto corte de luz afectó a las regiones desde Coquimbo hasta El Maule, además de parte de la Región de Atacama. El apagón se debió a una falla en el Sistema Interconectado Central, que suministra energía al 93% de la población del país, también se produjo una falla en el sistema de recuperación a distancia. Autoridades del país se refirieron al apagón como una "falla compleja" el cual además sumó caídas de sistemas de comunicación de telefonía móvil y del servicio de agua.</p>	Afectó desde Copiapó a Talca, alrededor de 10 millones de personas.	Chile	Aproximadamente entre 1 a 5 horas
14 de marzo de 2010	<p>Se dio por una falla en la estación transformadora de Charrúa, en el sector de Los Ángeles, y por el fundimiento del segundo transformador de aquella planta, se encontraba a la espera de su reemplazo por problemas ocurridos durante el terremoto del 27 de febrero de 2010 de 8.8 MW en la escala de Richter, afectando una de las principales líneas de alto voltaje de 500 KV.</p>	El apagón fue desde Talca a Chile, un total de 12,5 millones de habitantes	Chile	Entre 1 y 6 horas
Entre enero y febrero de 2008	<p>Este apagón fue en consecuencia por las grandes tormentas invernales que azotaron al centro de China. Un total de 11 técnicos fallecieron en su trabajo, intentado restablecer la</p>	4 millones	China, Chenzhou	10 días

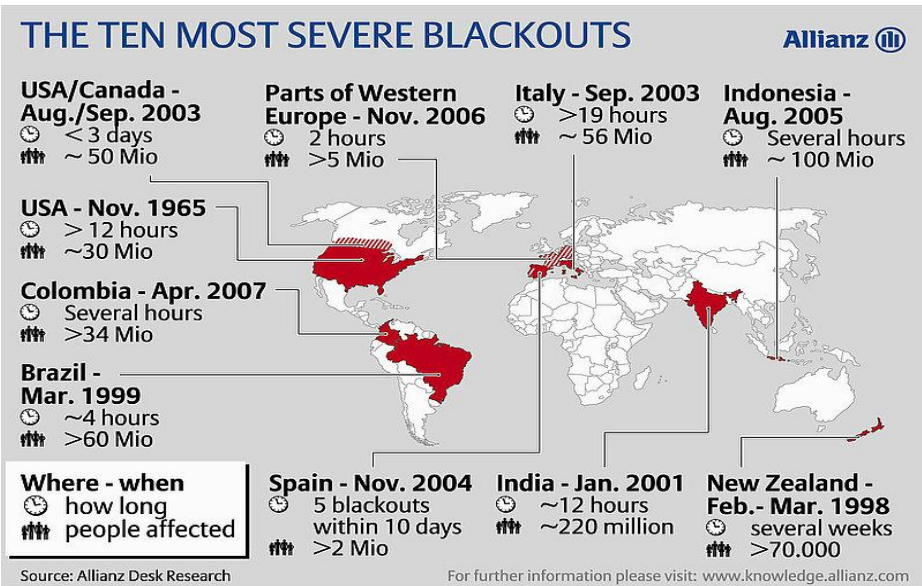
	electricidad.			
17 de mayo de 2007	El siniestro fue a causa de un incendio en la subestación de Transener, causa el apagón en gran parte de la zona sur y oeste del Conurbano Bonaerense y el Sur de la Ciudad de Buenos Aires, también el incendio afectó a los partidos de Almirante Brown, Esteban Echeverría y Quilmes.	168.000 de usuarios.	Ciudad Autónoma de Buenos Aires	3 horas
23 de octubre de 2004	El apagón se produjo cuando se quemó un transformador de la red de alta tensión, en una hora, Edenor solucionó el problema.	600.000 personas afectadas	Ciudad de Buenos Aires, Argentina	1 hora
27 de septiembre de 2004	Este apagón se dio por el fallo en una subestación del estado de Sergipe.	47 millones de personas	Los estados de Maranhão, Piauí, Ceará, Río Grande do Norte, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Sergipe y Bahía, Brasil.	1 hora
22 de enero de 2002	Se cayeron tres líneas de transmisión, procedentes de la fábrica de Itaipu.	100 millones de personas.	San Pablo, Río de Janeiro, Minas Gerais y Brasília, Brasil	1 hora
23 de julio de 2007	La causa fue un incendio en la subestación Maragall, en dos transformadores.	283.000 personas.	España	58 horas
19 de febrero de 1998	La razón de dicho apagón fue que los cables subterráneos que abastecían energía a la ciudad colapsaron, estos cables no habían	6.000 de personas.	Nueva Zelanda	66 días

	sido cambiados, eran viejos y estaban muy deteriorados.		
--	---	--	--

3.3. RESEÑA DE LOS 10 PEORES APAGONES ELÉCTRICOS EN 50 AÑOS

Con la siguiente ilustración se explica de manera breve los 10 apagones eléctricos más severos ocurridos en el mundo:

Ilustración 10. Los 10 Blackouts más severos.



The publication of this graphic is free of charge provided that users credit Allianz SE. Graphics are available in the media section of the Allianz Knowledge Site. www.knowledge.allianz.com/en/media/graphics

Fuente. Allianz Desk research [16].

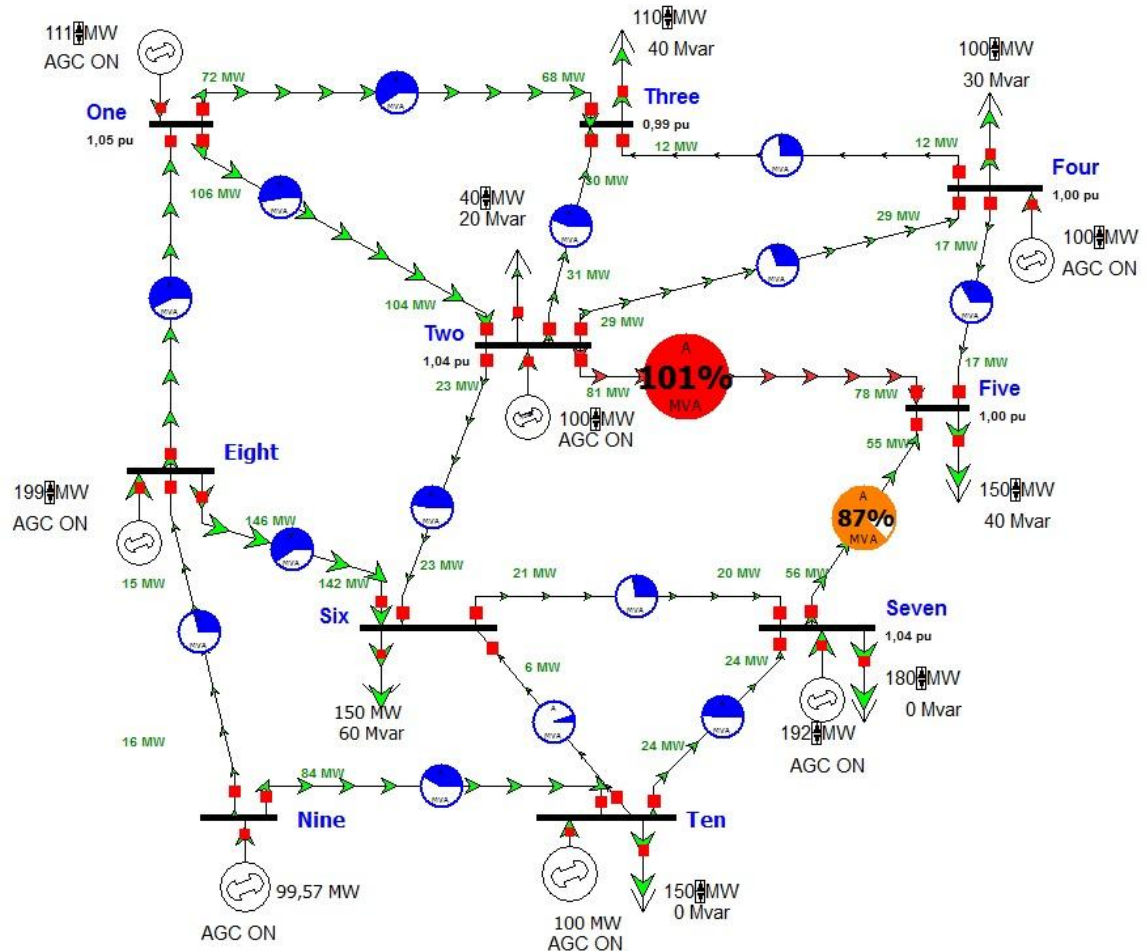
CAPÍTULO IV:

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1. CASO BASE

El sistema eléctrico de potencia analizado en contingencias **n-1** es el sistema *B10 Reserve* existente en el software computacional *Powerworld*, la conexión del sistema es la que se observa en la ilustración 11, con todos sus elementos en operación y todas las conexiones debidamente realizadas.


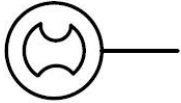



Ilustración 11. Sistema eléctrico B10 Reserve en estado estable.



Fuente [1]

Para los gráficos trabajados con el software computacional *Powerworld* es referencian los símbolos en la siguiente tabla de convenciones:

Tabla 2. Cuadro de convenciones.

CUADRO DE CONVENCIONES	
SÍMBOLO	TEXTO
	CARGA
	GENERADOR
	FLUJO DE POTENCIA ACEPTABLE
	FLUJO DE POTENCIA CON SOBRECARGA
	INDICADOR DEL LÍMITE DE POTENCIA PARA LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

El sistema *B10 Reserve* es un sistema eléctrico de potencia con tensión nominal de 138KV que consta de 10 barras, 7 generadores, 7 cargas y 16 líneas de transmisión; el total de la carga es de 880 MW y 190 MVAR, la generación total es de 907.2 MW y 284.4 MVAR; las pérdidas totales en el sistema son de 27.2 MW y 96.4 MVAR. Los valores de tensiones, flujos de potencia y cargas para el caso base son los que se observan en las siguientes tablas:

Tabla 3. Datos de líneas.

Datos de líneas									
From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	105,7	-6	105,8	200	52,9	2,03	5,61
One	Three	Closed	71,7	4,3	71,8	120	59,9	3,77	6,09
Eight	One	Closed	68,2	-6,9	68,5	120	57,6	1,3	10,85
Two	Three	Closed	31	15,9	34,8	80	43,9	0,71	-1,99
Two	Four	Closed	29,1	11,8	31,4	100	31,9	0,58	-2,43
Two	Five	Closed	80,7	6,1	80,9	80	101,2	2,43	4,16
Two	Six	Closed	23,7	51,6	56,8	120	49,6	0,65	-3,28
Three	Four	Closed	-11,8	-23,9	26,6	100	26,6	0,07	-1,78
Four	Five	Closed	17,5	-9,6	20	60	33,3	0,29	-4,16

Seven	Five	Closed	55,4	42,1	69,6	80	87,1	0,93	-1,39
Six	Seven	Closed	20,5	-23,5	31,2	110	28,4	0,68	-3,17
Eight	Six	Closed	146	24,2	148	250	59,2	4,05	40,52
Six	Ten	Closed	-5,6	2,1	5,9	120	5	0	0,07
Ten	Seven	Closed	24,4	-26,1	35,7	70	51	0,92	-2,44
Eight	Nine	Closed	-15,3	31,1	34,7	120	28,9	0,33	1,67
Nine	Ten	Closed	84,1	0,6	84,1	200	42,1	3,54	24,78

Tabla 4. Datos de generadores.

Datos de generadores									
Name of Bus	Status	Gen MW	Gen Mvar	Set Volt	Min MW	Max MW	Min Mvar	Max Mvar	Part. Factor
One	Closed	102,13	17,70	1,05	50	250	-200	200	1
Two	Closed	102,43	120,59	1,04	50	300	-200	200	1
Four	Closed	107,04	25,66	1	50	200	-200	200	1
Seven	Closed	232,67	72,11	1,04	0	300	-200	200	1
Eight	Closed	239,46	45,19	1,04	150	300	-200	200	1
Nine	Closed	74,92	-22,25	1	0	200	-200	200	10
Ten	Closed	42,98	7,84	1	0	1000	-9900	9900	10

Tabla 5. Datos de cargas

Datos de cargas							
Name of Bus	Area Name of Load	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	A	Closed	40,00	20,00	44,72	40	20
Three	A	Closed	110,00	40,00	117,05	110	40
Four	A	Closed	100,00	30,00	104,4	100	30
Five	A	Closed	150,00	40,00	155,24	150	40
Six	B	Closed	150,00	60,00	161,55	150	60
Seven	B	Closed	180,00	0,00	180	180	0
Ten	B	Closed	150,00	0,00	150	150	0

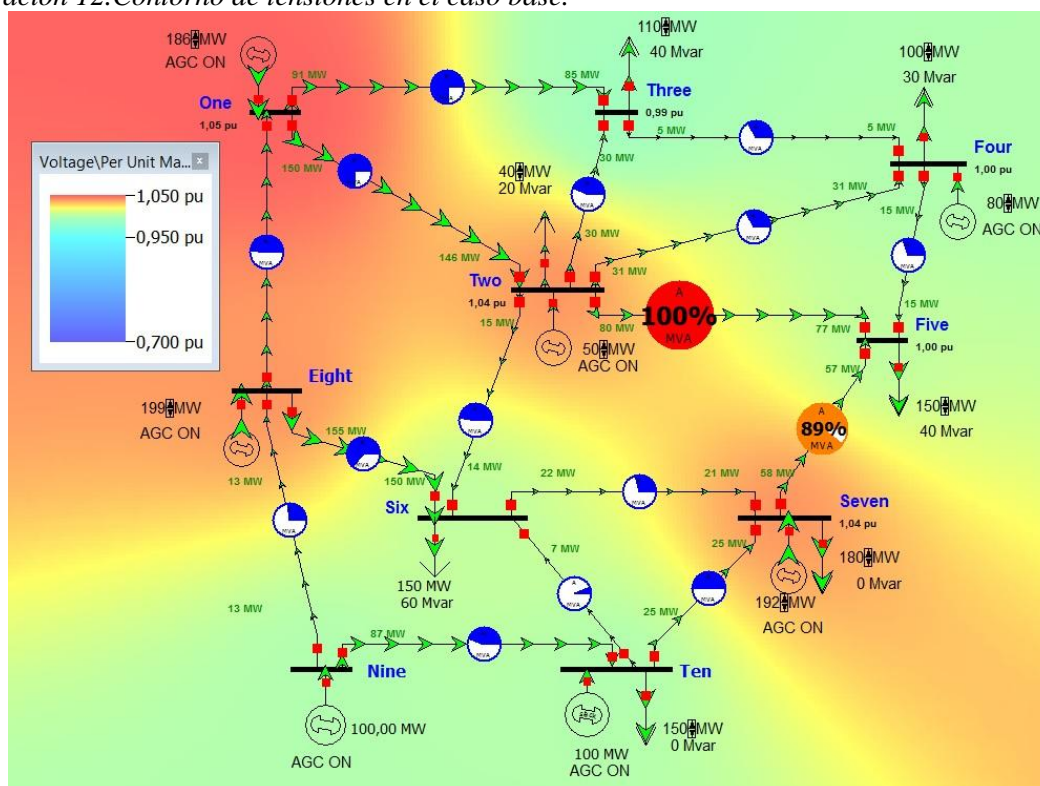
Tabla 6. Datos de barras.

Datos de barras								
Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
One	138,00	1,05000	144,900	5,64			102,13	17,69
Two	138,00	1,04000	143,520	-0,93	40,00	20	102,44	120,58
Three	138,00	0,99200	136,896	-3,20	110,00	40		
Four	138,00	1,00000	138,000	-3,04	100,00	30	107,05	25,65

Five	138,00	1,00425	138,586	-5,63	150,00	40		
Six	138,00	1,00120	138,165	-1,46	150,00	60		
Seven	138,00	1,04000	143,520	-4,04	180,00	0	232,66	72,11
Eight	138,00	1,04000	143,520	15,27			239,45	45,17
Nine	138,00	1,00000	138,000	14,48			74,82	-22,26
Ten	138,00	1,00000	138,000	-3,67	150,00	0	43,09	7,81

Además de tener los datos de tensiones en las tablas se cuenta con una herramienta muy importante y útil en el software computacional que permite analizar el comportamiento de las tensiones del sistema de manera más gráfica, presentando un mapa de colores en el cual las zonas rojas cuentan con tensiones muy altas, mayores a 1 p.u., las zonas verdes cuentan con tensiones de 1 p.u. o muy próximas y las zonas azules tienen tensiones de 0.95 p.u. o inferiores. El mapa de colores para el caso base es el que se puede observar en la siguiente ilustración.

Ilustración 12. Contorno de tensiones en el caso base.



4.2. PRUEBAS DE CONTINGENCIA N-1

Se procede a retirar un elemento del sistema a analizar cuáles son las consecuencias para el sistema, si sigue operando o si este acto ocasiona la salida de algún otro elemento del sistema.

4.2.1. Pruebas en las líneas de transmisión

Los primeros elementos en analizar son las líneas de transmisión, para evaluar los puntos críticos y las líneas críticas para el sistema. Los datos resaltados en color verde indican la línea que sale de operación, y los datos resaltados en color rojo indican las líneas que está presentado sobrecarga.

Prueba en la línea 1-2

Se procede a desconectar la línea 1-2 para hacer seguimiento a la contingencia generada. Al desconectar la línea 1-2 se produce sobrecarga en otras líneas del sistema, lo que genera que por operación de las protecciones salga la siguiente línea con la sobrecarga más alta de operación. Las tensiones al desconectar la línea 1-2 son las que se observan en la siguiente ilustración.

Ilustración 13. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 1-2.

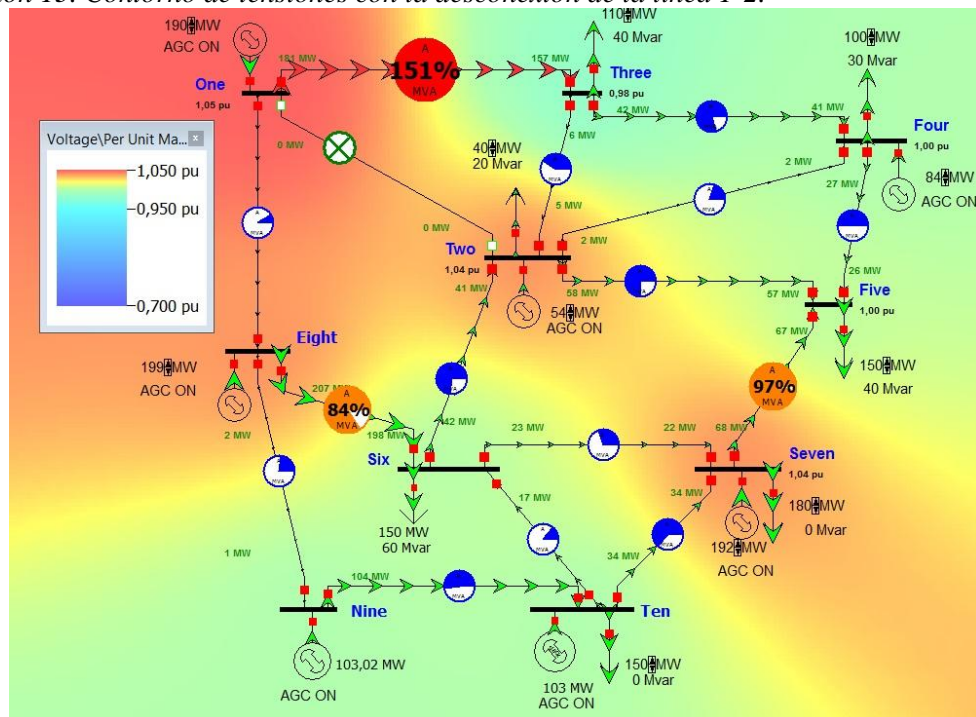


Tabla 7. Desconexión de la línea 1-2.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Open	0	0	0	200	0	0	0
One	Three	Closed	134,1	0,5	134,1	120	111,8	13,06	33,99
Eight	One	Closed	22,1	-6,2	23	120	19,3	0,15	1,22
Two	Three	Closed	5,2	26	26,5	80	36,4	0,45	-2,75
Two	Four	Closed	7,9	18,3	19,9	100	23	0,27	-3,36
Two	Five	Closed	65,4	9,7	66,1	80	82,6	1,63	1,75
Two	Six	Closed	-15,9	66,4	68,3	120	59	0,93	-2,43
Three	Four	Closed	15,8	-44,7	47,4	100	47,4	0,22	-1,31
Four	Five	Closed	25,7	-11,9	28,3	60	47,2	0,6	-3,22
Seven	Five	Closed	62,2	39,6	73,7	80	92,2	1,04	-1,07
Six	Seven	Closed	21,3	-24	32,1	110	29,2	0,73	-3,04
Eight	Six	Closed	182,2	32,4	185,1	250	74	6,33	63,33
Six	Ten	Closed	-12,3	1,9	12,4	120	10,4	0	0,31
Ten	Seven	Closed	30,6	-27,6	41,2	70	58,9	1,25	-1,45
Eight	Nine	Closed	-5,2	28,9	29,3	120	24,4	0,24	1,19
Nine	Ten	Closed	96,1	2,8	96,1	200	48	4,62	32,32

Tabla 8. Salida de operación de la línea 1-3.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Open	0	0	0	200	0	0	0
One	Three	Open	0	0	0	120	0	0	0
Eight	One	Closed	-106,6	22,5	109	120	91,7	3,3	27,46
Two	Three	Closed	58,1	12,3	59,4	80	74,2	1,99	1,85
Two	Four	Closed	49,1	6,4	49,5	100	49,5	1,38	-0,03
Two	Five	Closed	60,5	11	61,5	80	76,9	1,41	1,1
Two	Six	Closed	-107,4	120	161	120	134,2	4,92	9,58
Three	Four	Closed	-53,9	-29,5	61,5	100	61,5	0,38	-0,82
Four	Five	Closed	-6,3	-2,1	6,6	60	11,6	0,03	-4,93
Seven	Five	Closed	99,2	29,1	103,4	80	129,3	2	1,82
Six	Seven	Closed	33,5	-30,7	45,5	110	41,3	1,56	-0,5
Eight	Six	Closed	283,5	75,7	293,4	250	117,4	15,92	159,21
Six	Ten	Closed	-28,2	-2,4	28,3	120	23,7	0	1,62
Ten	Seven	Closed	57,4	-33	66,3	70	94,7	3,38	4,95
Eight	Nine	Closed	23,2	23,3	32,9	120	27,4	0,3	1,5
Nine	Ten	Closed	133,8	13,2	134,4	200	67,2	9,04	63,27

La salida de operación de la línea 1-3 en el sistema provoca sobrecarga en diferentes líneas del sistema, lo que genera un efecto en cadena, haciendo que una por una, las líneas se sobrecarguen y se desconecten por operación de las protecciones.

Tabla 9. Salida de operación de la línea 7-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Open	0	0	0	200	0	0	0
One	Three	Open	0	0	0	120	0	0	0
Eight	One	Closed	-106,5	22,5	108,8	120	91,5	3,28	27,37
Two	Three	Closed	70,3	-0,3	70,3	80	87,9	2,86	4,57
Two	Four	Closed	64	-8,7	64,5	100	64,5	2,39	3,09
Two	Five	Closed	136,1	38,5	141,5	80	176,8	7,75	20,41
Two	Six	Closed	-206,4	150,4	255,4	120	212,8	12,71	33,13
Three	Four	Closed	-42,6	-44,8	61,8	100	61,8	0,39	-0,8
Four	Five	Closed	22,4	19,6	29,8	60	51,3	0,79	-2,28
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-34	-14	36,8	110	33,7	1,07	-1,89
Eight	Six	Closed	278,7	80,4	290,1	250	116	15,56	155,61
Six	Ten	Closed	-71,9	-3,9	72	120	61,2	0	10,77
Ten	Seven	Closed	25,1	-26,3	36,3	70	51,9	0,95	-2,34
Eight	Nine	Closed	29,3	22,3	36,8	120	30,7	0,38	1,88
Nine	Ten	Closed	105,7	4,9	105,8	200	52,9	5,6	39,18

Tabla 10. Salida de operación de la línea 2-6.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Open	0	0	0	200	0	0	0
One	Three	Open	0	0	0	120	0	0	0
Eight	One	Closed	-49,3	4,6	49,5	120	41,7	0,68	5,67
Two	Three	Closed	0	0	0	80	0	0	0
Two	Four	Closed	0	0	0	100	0	0	0
Two	Five	Closed	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Open	0	0	0	120	0	0	0
Three	Four	Closed	0	0	0	100	0	0	0
Four	Five	Closed	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	3,4	-53,1	53,2	110	50,9	2,55	2,89
Eight	Six	Closed	249,7	109,5	272,6	250	109	13,74	137,43
Six	Ten	Closed	82,6	-34,9	89,6	120	82,4	0	19,56
Ten	Seven	Closed	-54,9	2,9	55	70	82	2,44	2,11

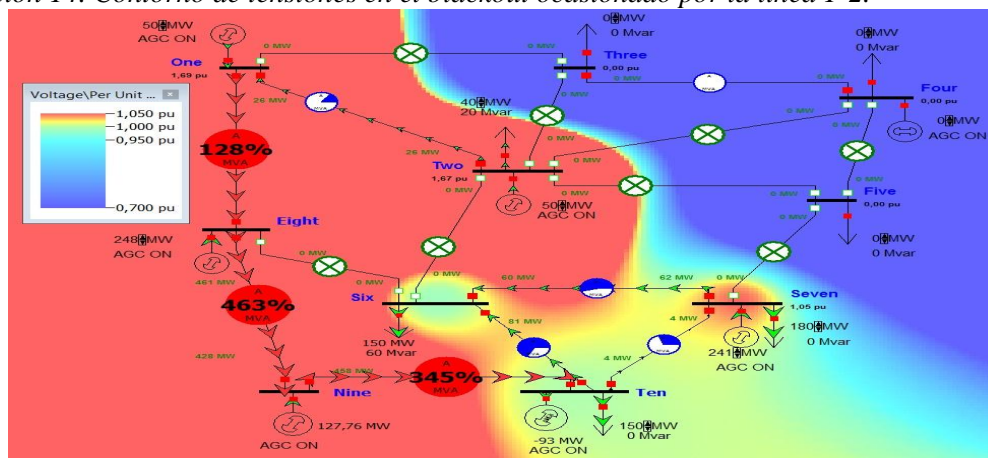
Eight	Nine	Closed	46,8	19,7	50,8	120	42,3	0,72	3,58
Nine	Ten	Closed	178,2	33,2	181,3	200	90,7	16,44	115,06

Tabla 11. Salida de operación de la línea 8-6.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Open	0	0	0	200	0	0	0
One	Three	Open	0	0	0	120	0	0	0
Eight	One	Closed	-123	11,5	123,5	120	103,9	1,7	14,14
Two	Three	Closed	0	0	0	80	0	0	0
Two	Four	Closed	0	0	0	100	0	0	0
Two	Five	Closed	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Open	0	0	0	120	0	0	0
Three	Four	Closed	0	0	0	100	0	0	0
Four	Five	Closed	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-58,6	-5,8	58,9	110	56,5	2,85	3,39
Eight	Six	Open	0	0	0	250	0	0	0
Six	Ten	Closed	-83,4	-1	83,4	120	70,6	0	14,37
Ten	Seven	Closed	8,2	-25,3	26,6	70	38	0,47	-3,84
Eight	Nine	Closed	439	293,6	528,2	120	440,1	31,03	155,17
Nine	Ten	Closed	450,7	502,5	675	200	337,5	126,94	888,61

La salida de operación de ésta última línea por el efecto en cascada, genera un blackout para el sistema, por lo que sale por completo de operación. Las tensiones existentes que quedan en las barras son las que se observan en la ilustración 14.

Ilustración 14. Contorno de tensiones en el blackout ocasionado por la línea 1-2.



Prueba en la línea 1-3

Se procede a desconectar la línea 1-3 para hacer seguimiento a la contingencia generada. El cambio en las tensiones del sistema que ocasiona la desconexión de la línea 1-3 se puede observar en el mapa de contornos de tensiones de la siguiente ilustración.

Tabla 12. Desconexión de la línea 1-3.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	139,6	-7	139,7	200	69,9	3,54	14,66
One	Three	Open	0	0	0	120	0	0	0
Eight	One	Closed	71,7	-6,7	72	120	60,6	1,44	12
Two	Three	Closed	54,5	13,1	56	80	70	1,78	1,22
Two	Four	Closed	44,8	7,5	45,5	100	45,5	1,17	-0,66
Two	Five	Closed	83,1	5,6	83,3	80	104,1	2,57	4,58
Two	Six	Closed	35	57,3	67,2	120	57,4	0,89	-2,52
Three	Four	Closed	-57,3	-28,1	63,8	100	63,9	0,41	-0,73
Four	Five	Closed	7,3	-6,5	9,8	60	16,4	0,06	-4,85
Seven	Five	Closed	63,3	39,7	74,7	80	93,4	1,06	-0,98
Six	Seven	Closed	16,8	-24,6	29,8	110	27,1	0,62	-3,34
Eight	Six	Closed	171,6	32,4	174,6	250	69,8	5,64	56,38
Six	Ten	Closed	33,3	0,4	33,3	120	27,8	0	2,22
Ten	Seven	Closed	-9,2	-16,1	18,5	70	26,5	0,22	-4,56
Eight	Nine	Closed	0	27,7	27,7	120	23,1	0,21	1,07
Nine	Ten	Closed	113,5	6,9	113,7	200	56,9	6,47	45,26

La desconexión de la línea 1-3 genera sobrecarga en las demás líneas del sistema, llevándolo a un efecto en cascada como se puede observar en las siguientes tablas.

Ilustración 15. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 1-3.

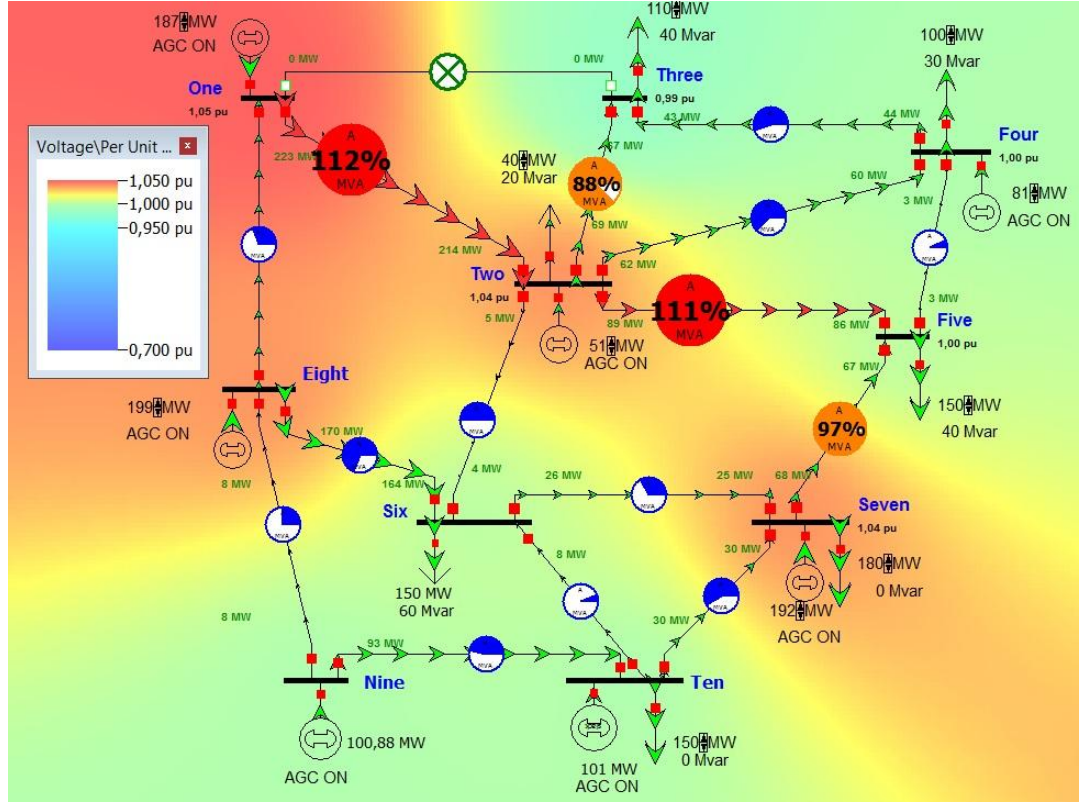


Tabla 13. Salida de operación de la línea 2-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	134,1	-6,9	134,3	200	67,2	3,27	13,05
One	Three	Open	0	0	0	120	0	0	0
Eight	One	Closed	65,3	-7	65,6	120	55,2	1,19	9,96
Two	Three	Closed	71,5	9,6	72,2	80	90,2	2,92	4,64
Two	Four	Closed	65	2,8	65,1	100	65,1	2,36	2,91
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	76,5	50	91,4	120	76,2	1,6	-0,39
Three	Four	Closed	-41,4	-35,1	54,2	100	54,2	0,3	-1,08
Four	Five	Closed	43,1	-9,4	44,1	60	73,6	1,53	-0,36
Seven	Five	Closed	111,2	53,5	123,4	80	154,3	2,86	4,47
Six	Seven	Closed	46,8	-32,8	57,1	110	51,9	2,51	2,34
Eight	Six	Closed	173,5	34,5	176,9	250	70,8	5,79	57,86
Six	Ten	Closed	45,8	-0,1	45,8	120	38,4	0	4,24
Ten	Seven	Closed	10,7	-22,4	24,8	70	35,4	0,41	-3,98
Eight	Nine	Closed	4,8	26,8	27,2	120	22,7	0,21	1,03

Nine	Ten	Closed	119,8	8,6	120,1	200	60	7,21	50,46
-------------	-----	--------	-------	-----	-------	-----	----	------	-------

Tabla 14. Salida de operación de la línea 7-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	150,9	-7	151,1	200	75,5	4,13	18,25
One	Three	Open	0	0	0	120	0	0	0
Eight	One	Closed	80,1	-6,2	80,3	120	67,6	1,79	14,91
Two	Three	Closed	124,6	30,7	128,3	80	160,4	9,21	23,72
Two	Four	Closed	126,8	25	129,3	100	129,3	9,33	24,06
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-19,9	72,3	75	120	64,2	1,11	-1,87
Three	Four	Closed	5,4	-33	33,5	100	33,5	0,12	-1,39
Four	Five	Closed	147,5	139,4	202,9	60	338,2	37,67	110,12
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-21,6	-11,2	24,3	110	22,1	0,43	-3,91
Eight	Six	Closed	170,5	30,9	173,3	250	69,3	5,55	55,53
Six	Ten	Closed	15,6	0,7	15,6	120	13	0	0,48
Ten	Seven	Closed	-33,6	-6,8	34,3	70	49,7	0,92	-2,45
Eight	Nine	Closed	-7,2	29,3	30,2	120	25,2	0,25	1,26
Nine	Ten	Closed	106	5	106,1	200	53,1	5,63	39,43

Tabla 15. Salida de operación de la línea 4-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	132,5	-6,9	132,7	200	66,4	3,19	12,58
One	Three	Open	0	0	0	120	0	0	0
Eight	One	Closed	84,5	-5,9	84,7	120	71,3	1,99	16,6
Two	Three	Closed	82,8	7,6	83,1	80	103,9	3,85	7,46
Two	Four	Closed	78,3	0,1	78,3	100	78,3	3,41	6,05
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-15,3	70,5	72,1	120	62	1,03	-2,11
Three	Four	Closed	-31,1	-39,9	50,5	100	50,5	0,26	-1,2
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-21,2	-11,3	24,1	110	21,9	0,42	-3,94
Eight	Six	Closed	166,9	30,1	169,6	250	67,8	5,32	53,19
Six	Ten	Closed	16,5	0,8	16,5	120	13,8	0	0,54
Ten	Seven	Closed	-33,9	-6,6	34,6	70	50,2	0,93	-2,4
Eight	Nine	Closed	-8,1	29,5	30,6	120	25,5	0,26	1,3

Nine	Ten	Closed	104,9	4,7	105	200	52,5	5,52	38,62
-------------	-----	--------	-------	-----	-----	-----	------	------	-------

Tabla 16. Salida de operación de la línea 2-3.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	133,3	-6,9	133,5	200	66,7	3,23	12,8
One	Three	Open	0	0	0	120	0	0	0
Eight	One	Closed	84,3	-5,9	84,5	120	71,1	1,98	16,51
Two	Three	Closed	80,8	7,9	81,2	80	101,4	3,68	6,92
Two	Four	Closed	75,9	0,5	75,9	100	75,9	3,2	5,44
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-15,7	70,7	72,4	120	62,2	1,04	-2,08
Three	Four	Closed	-32,9	-39	51	100	51	0,26	-1,19
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-21,9	-11,1	24,6	110	22,3	0,44	-3,88
Eight	Six	Closed	167	30,1	169,6	250	67,9	5,32	53,22
Six	Ten	Closed	16,9	0,7	16,9	120	14,1	0	0,57
Ten	Seven	Closed	-34,9	-6,2	35,5	70	51,6	0,99	-2,25
Eight	Nine	Closed	-2,4	28,3	28,4	120	23,6	0,22	1,12
Nine	Ten	Closed	102,8	4,2	102,9	200	51,4	5,29	37,05

Tabla 17. Salida de operación de la línea 2-4.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	108,8	-6,1	109	200	54,5	2,15	6,34
One	Three	Open	0	0	0	120	0	0	0
Eight	One	Closed	59,8	-7,1	60,2	120	50,7	1,01	8,38
Two	Three	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Four	Open	0	0	0	100	0	0	0
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	116,6	55,1	129	120	107,5	3,13	4,27
Three	Four	Closed	0	0	0	100	0	0	0
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	13,8	-28,7	31,8	110	28,9	0,72	-2,96
Eight	Six	Closed	163,3	37,3	167,5	250	67	5,19	51,91
Six	Ten	Closed	107,9	5	108	120	91,3	0	24
Ten	Seven	Closed	-68,3	9,7	69	70	103,3	3,86	6,37
Eight	Nine	Closed	26,6	22,8	35	120	29,2	0,34	1,7

Nine	Ten	Closed	140,6	15,6	141,4	200	70,7	10	70,02
-------------	-----	--------	-------	------	-------	-----	------	----	-------

Tabla 18. Salida de operación de la línea 2-6.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	-10	7,2	12,3	200	8,4	0,04	-6,32
One	Three	Open	0	0	0	120	0	0	0
Eight	One	Closed	-59	7	59,4	120	50	0,98	8,16
Two	Three	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Four	Open	0	0	0	100	0	0	0
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Open	0	0	0	120	0	0	0
Three	Four	Closed	0	0	0	100	0	0	0
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	3,4	-54,3	54,4	110	52,4	2,69	3,34
Eight	Six	Closed	254,5	113,9	278,9	250	111,5	14,38	143,81
Six	Ten	Closed	86,8	-35,6	93,8	120	86,6	0	21,6
Ten	Seven	Closed	-58,3	4,5	58,5	70	87,2	2,76	3,07
Eight	Nine	Closed	55,4	18,6	58,4	120	48,7	0,95	4,74
Nine	Ten	Closed	180,9	34,8	184,3	200	92,1	16,97	118,82

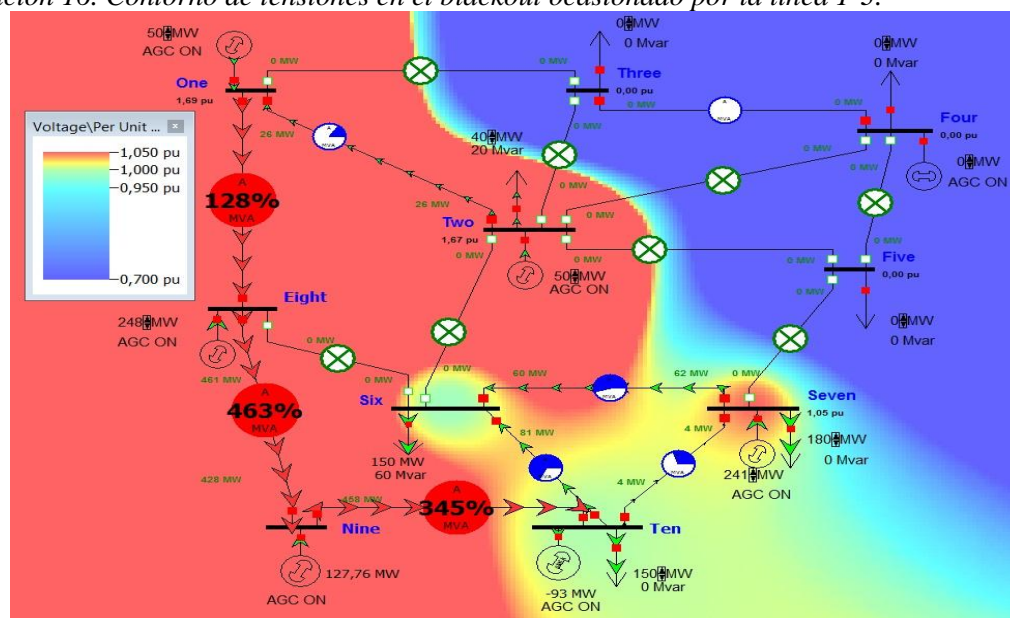
Tabla 19. Salida de operación de la línea 8-6.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	-25,9	18,7	32	200	21,9	0,1	-16,47
One	Three	Open	0	0	0	120	0	0	0
Eight	One	Closed	-153,6	18,3	154,7	120	130,2	2,55	21,24
Two	Three	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Four	Open	0	0	0	100	0	0	0
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Open	0	0	0	120	0	0	0
Three	Four	Closed	0	0	0	100	0	0	0
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-59	-2,7	59,1	110	56,5	2,83	3,27
Eight	Six	Open	0	0	0	250	0	0	0
Six	Ten	Closed	-81,7	2,8	81,8	120	68,7	0	13,59
Ten	Seven	Closed	5,4	-24,9	25,5	70	36,4	0,42	-3,98

Eight	Nine	Closed	466,5	314,3	562,4	120	468,7	33,69	168,45
Nine	Ten	Closed	459,7	519,9	694	200	347	129,69	907,8

Cuando esta última línea sale de operación como consecuencia del efecto en cascada se produce un blackout en el sistema; las tensiones que quedan son las que se observan en la ilustración.

Ilustración 16. Contorno de tensiones en el blackout ocasionado por la línea 1-3.



Prueba en la línea 1-8

Cuando la línea 1-8 sale de operación no genera sobrecarga en las demás líneas del sistema o desconexión de cualquier otro elemento, lo que no genera contingencia alguna y el sistema puede seguir operando de manera normal sin ella.

Tabla 20. Desconexión de la línea 1-8.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	107,5	-6	107,7	200	53,9	2,1	6,04
One	Three	Closed	76,2	3,7	76,3	120	63,6	4,25	7,53
Eight	One	Open	0	0	0	120	0	0	0
Two	Three	Closed	35,7	14,7	38,6	80	48,3	0,87	-1,53
Two	Four	Closed	35,4	10	36,8	100	36,8	0,78	-1,83
Two	Five	Closed	72,5	7,9	73	80	91,2	1,98	2,8
Two	Six	Closed	-28,2	72,6	77,9	120	66,5	1,2	-1,63
Three	Four	Closed	-3,2	-27,6	27,8	100	27,8	0,07	-1,76
Four	Five	Closed	9,1	-7,2	11,6	60	19,3	0,08	-4,77

Seven	Five	Closed	71,7	36,8	80,6	80	100,7	1,23	-0,49
Six	Seven	Closed	25,6	-25,5	36,1	110	32,9	0,94	-2,39
Eight	Six	Closed	198,9	37,5	202,5	250	81	7,58	75,79
Six	Ten	Closed	-13,7	1,4	13,8	120	11,5	0	0,38
Ten	Seven	Closed	36,2	-28,9	46,3	70	66,2	1,61	-0,38
Eight	Nine	Closed	0,2	27,7	27,7	120	23,1	0,21	1,06
Nine	Ten	Closed	102,3	4,1	102,4	200	51,2	5,24	36,71

Tabla 21. Tensiones con la salida de la línea 1-8.

Number	Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
1	One	138	1,05	144,9	1,5			183,8	-2,3
2	Two	138	1,04	143,5	-5,32	40	20	50	137,3
3	Three	138	0,992	136,8	-8,33	110	40		
4	Four	138	1	138	-8,43	100	30	77,66	36,83
5	Five	138	1,004	138,6	-9,89	150	40		
6	Six	138	1,002	138,3	-3,56	150	60		
7	Seven	138	1,04	143,5	-7,96	180	0	192,4	88,39
8	Eight	138	1,04	143,5	18,44			199,2	65,27
9	Nine	138	1	138	18,88			102,4	-22,5
10	Ten	138	1	138	-2	150	0	102,7	2,69

Prueba en la línea 2-3

La desconexión de la línea 2-3 no genera ninguna anomalía en el sistema, y este sigue operando de manera normal, las tensiones se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 22. Desconexión de la línea 2-3.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	96,4	-5,5	96,5	200	48,3	1,69	3,56
One	Three	Closed	78,3	6,7	78,6	120	65,5	4,51	8,36
Eight	One	Closed	73,6	-6,6	73,9	120	62,2	1,52	12,64
Two	Three	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Four	Closed	39,5	8,9	40,5	100	40,5	0,93	-1,36
Two	Five	Closed	79,7	6,3	79,9	80	99,9	2,37	3,98
Two	Six	Closed	38	52,1	64,5	120	55,2	0,82	-2,74
Three	Four	Closed	-36,2	-41,7	55,2	100	55,2	0,31	-1,05
Four	Five	Closed	9,5	-7,3	12	60	20	0,09	-4,75

Seven	Five	Closed	64,4	39,2	75,4	80	94,2	1,08	-0,93
Six	Seven	Closed	14,1	-22,9	26,9	110	24,5	0,49	-3,74
Eight	Six	Closed	151,1	26,7	153,4	250	61,4	4,35	43,53
Six	Ten	Closed	19,8	1	19,9	120	16,5	0	0,79
Ten	Seven	Closed	-1,7	-18,6	18,7	70	26,7	0,21	-4,58
Eight	Nine	Closed	14,7	24,9	28,9	120	24,1	0,23	1,16
Nine	Ten	Closed	88,7	1,4	88,7	200	44,3	3,93	27,51

Tabla 23. Tensiones con la salida de la línea 2-3.

Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
One	138	1,05002	144,903	6,37			186,56	12,61
Two	138	1,04002	143,522	-2,69	40	20	50,45	108,67
Three	138	0,98258	135,596	-6,88	110	40		
Four	138	1,00002	138,003	-6,89	100	30	80,45	66,92
Five	138	1,00402	138,555	-8,18	150	40		
Six	138	1,00394	138,544	-2,68	150	60		
Seven	138	1,04001	143,521	-6,66	180	0	192,13	86,82
Eight	138	1,04002	143,523	14,13			198,92	49,11
Nine	138	1,00002	138,003	15,68			99,94	-27,93
Ten	138	1	138	-2	150	0	99,98	-3,35

Prueba en la línea 2-4

La desconexión de la línea 2-4 genera una sobrecarga en otra línea del sistema, que a su vez debe de salir de operación. El mapa de contorno de tensiones muestra la variación que produce la desconexión de la línea.

Ilustración 17. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 2-4.

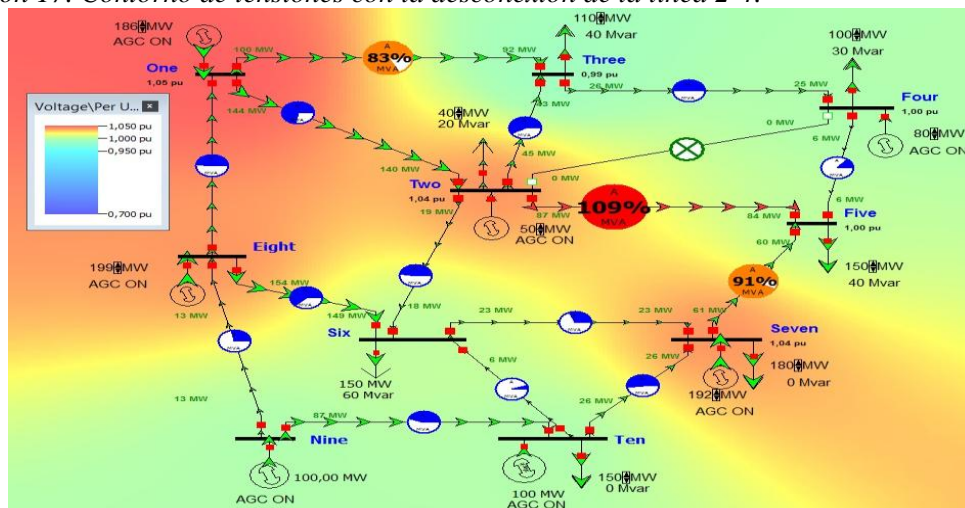


Tabla 24. Desconexión de la línea 2-4.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	98,2	-5,6	98,3	200	49,2	1,75	3,95
One	Three	Closed	75,8	3,8	75,9	120	63,3	4,2	7,4
Eight	One	Closed	73,1	-6,6	73,4	120	61,8	1,5	12,46
Two	Three	Closed	40,7	13,4	42,8	80	53,5	1,05	-0,97
Two	Four	Open	0	0	0	100	0	0	0
Two	Five	Closed	80,2	6,2	80,5	80	100,6	2,4	4,08
Two	Six	Closed	37,9	52,2	64,5	120	55,2	0,82	-2,74
Three	Four	Closed	1,3	-29,3	29,3	100	29,3	0,08	-1,74
Four	Five	Closed	8,6	-7	11	60	18,4	0,07	-4,8
Seven	Five	Closed	64,8	39,2	75,7	80	94,6	1,09	-0,91
Six	Seven	Closed	14,3	-23	27,1	110	24,6	0,5	-3,72
Eight	Six	Closed	151,5	26,8	153,8	250	61,5	4,38	43,75
Six	Ten	Closed	19,8	0,9	19,9	120	16,6	0	0,79
Ten	Seven	Closed	-1,5	-18,7	18,7	70	26,7	0,21	-4,57
Eight	Nine	Closed	14,8	24,8	28,9	120	24,1	0,23	1,16
Nine	Ten	Closed	88,8	1,4	88,8	200	44,4	3,94	27,61

Tabla 25. Salida de operación de la línea 2-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	83,9	-4,6	84	200	42	1,28	1,11
One	Three	Closed	86,8	2,8	86,8	120	72,3	5,48	11,24
Eight	One	Closed	68,6	-6,8	69	120	58	1,32	11
Two	Three	Closed	63,3	8,5	63,9	80	79,9	2,29	2,74
Two	Four	Open	0	0	0	100	0	0	0
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	82,6	43,9	93,5	120	78	1,66	-0,2
Three	Four	Closed	32,3	-42,8	53,6	100	53,6	0,28	-1,13
Four	Five	Closed	40,3	-8,8	41,3	60	68,8	1,33	-0,94
Seven	Five	Closed	114	52,6	125,5	80	156,9	2,96	4,75
Six	Seven	Closed	45,2	-31,5	55,1	110	50,1	2,32	1,76
Eight	Six	Closed	151,8	28,5	154,4	250	61,8	4,41	44,08
Six	Ten	Closed	33,1	0,1	33,1	120	27,6	0	2,2
Ten	Seven	Closed	19	-24,7	31,1	70	44,5	0,68	-3,16
Eight	Nine	Closed	19,2	24	30,8	120	25,6	0,26	1,31
Nine	Ten	Closed	94,7	2,5	94,8	200	47,4	4,49	31,43

La salida de operación de la línea 2-5 genera una sobrecarga en el sistema, lo que provoca la salida de otra línea de operación, este suceso provoca un efecto en cascada como se puede observar en las siguientes tablas.

Tabla 26. Salida de operación de la línea 7-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	64,5	-3	64,6	200	32,3	0,75	-2,03
One	Three	Closed	130,4	32,3	134,4	120	112	13,23	34,87
Eight	One	Closed	92,9	-5,2	93,1	120	78,3	2,4	20,01
Two	Three	Closed	135,1	40,9	141,2	80	176,5	11,16	29,65
Two	Four	Open	0	0	0	100	0	0	0
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-7	63,7	64,1	120	55,8	0,82	-2,75
Three	Four	Closed	131,2	-31,3	134,8	100	134,8	2,18	4,89
Four	Five	Closed	138,3	133,8	192,5	60	320,8	36,44	106,65
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-24,1	-9,3	25,8	110	23,5	0,5	-3,73
Eight	Six	Closed	141,5	23,9	143,5	250	57,4	3,81	38,07
Six	Ten	Closed	3,9	1,6	4,2	120	3,5	0	0,04
Ten	Seven	Closed	-27,4	-9,3	28,9	70	41,3	0,64	-3,3
Eight	Nine	Closed	5	26,7	27,2	120	22,7	0,21	1,03
Nine	Ten	Closed	78,4	-0,2	78,4	200	39,2	3,08	21,54

Tabla 27. Salida de operación de la línea 4-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	58,9	-2,5	59	200	29,5	0,63	-2,77
One	Three	Closed	85,3	3,1	85,4	120	71,1	5,31	10,71
Eight	One	Closed	94,3	-5	94,4	120	79,5	2,47	20,61
Two	Three	Closed	76,3	6	76,5	80	95,7	3,27	5,67
Two	Four	Open	0	0	0	100	0	0	0
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-5,6	63,2	63,5	120	55,3	0,81	-2,79
Three	Four	Closed	43	-47,3	64	100	64	0,41	-0,76
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-24	-9,4	25,7	110	23,4	0,49	-3,74
Eight	Six	Closed	140,4	23,7	142,4	250	57	3,75	37,49
Six	Ten	Closed	4,2	1,6	4,5	120	3,7	0	0,04

Ten	Seven	Closed	-27,5	-9,3	29	70	41,4	0,64	-3,28
Eight	Nine	Closed	4,7	26,8	27,2	120	22,7	0,21	1,03
Nine	Ten	Closed	78,1	-0,3	78,1	200	39,1	3,05	21,37

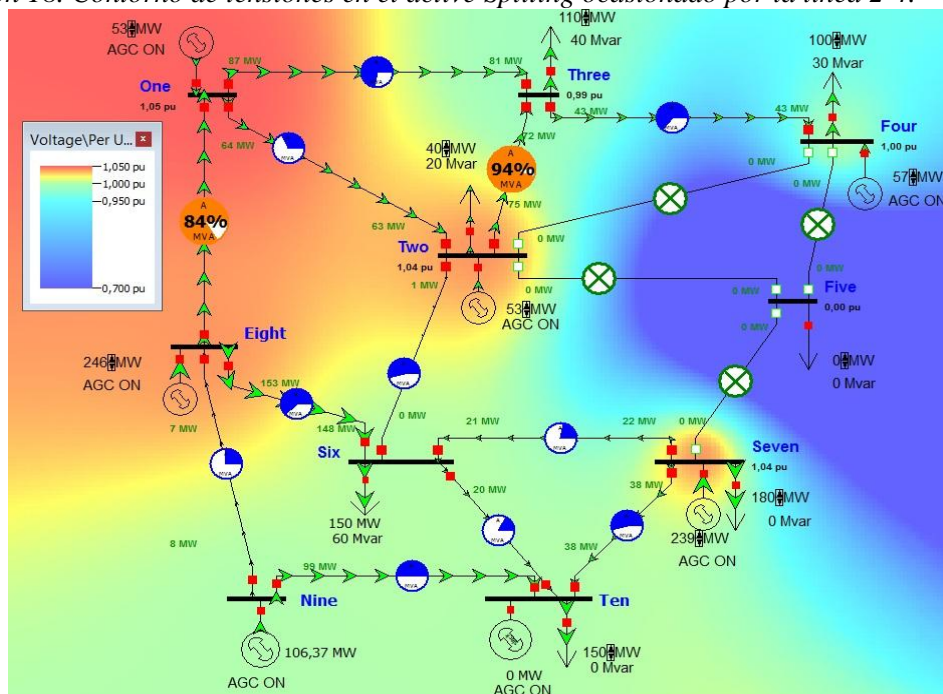
La salida de operación de la línea 4-5 no genera un blackout, por lo que el sistema sigue funcionando de manera dividida; el fenómeno se conoce como active Spliting, la carga número 5 queda sin alimentación y de esta manera se aliviana el sistema.

Tabla 28. Cargas del sistema.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	0	0	0	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Como se observa en la tabla 27 el evento conllevó a sacar de operación todas las líneas que alimentaban el nodo 5, de manera que al aislarlo o desconectarlo del sistema, los demás nodos seguiría trabajando de manera normal. El mapa de contorno de tensiones se puede observar en la siguiente ilustración.

Ilustración 18. Contorno de tensiones en el active Spliting ocasionado por la línea 2-4.



Prueba en la línea 2-5

Ilustración 19. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 2-5.

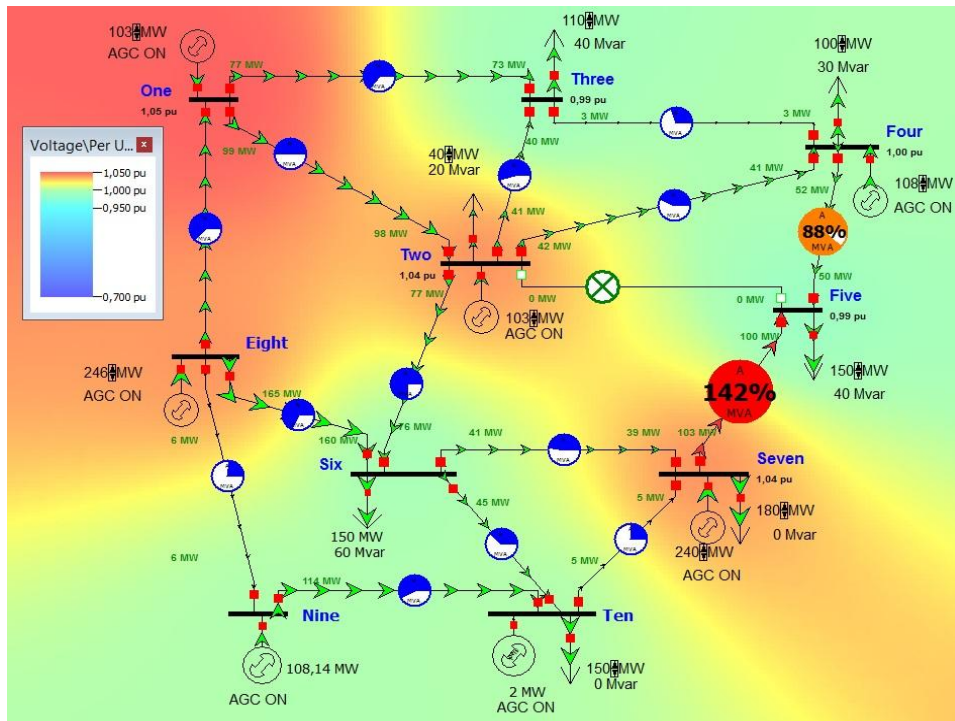


Tabla 29. Desconexión de la línea 2-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	94,4	-5,3	94,6	200	47,3	1,62	3,15
One	Three	Closed	74,7	4	74,8	120	62,4	4,09	7,04
Eight	One	Closed	67,5	-6,9	67,8	120	57,1	1,28	10,63
Two	Three	Closed	41,5	13,1	43,5	80	54,4	1,08	-0,88
Two	Four	Closed	42	8,2	42,8	100	42,8	1,04	-1,05
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	72,3	45,7	85,5	120	71,3	1,4	-1
Three	Four	Closed	1	-29,1	29,1	100	29,1	0,08	-1,74
Four	Five	Closed	49,8	-10,6	50,9	60	84,9	2,04	1,18
Seven	Five	Closed	104,9	55,6	118,7	80	148,4	2,65	3,84
Six	Seven	Closed	39,3	-30,1	49,5	110	45	1,85	0,34
Eight	Six	Closed	153,2	28,4	155,8	250	62,3	4,49	44,89
Six	Ten	Closed	30,3	0,3	30,3	120	25,3	0	1,84
Ten	Seven	Closed	15,2	-23,7	28,1	70	40,2	0,54	-3,57
Eight	Nine	Closed	18,9	24,1	30,6	120	25,5	0,26	1,3
Nine	Ten	Closed	94,1	2,4	94,1	200	47,1	4,43	31

La desconexión de la línea 2-5 genera sobrecarga en otra línea del sistema, la cual debe salir de operación, y seguidamente provoca un efecto en cascada como se puede observar en las siguientes tablas.

Tabla 30. Salida de operación de la línea 7-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	90,4	-5,1	90,5	200	45,3	1,48	2,34
One	Three	Closed	100,6	12	101,3	120	84,4	7,5	17,41
Eight	One	Closed	86,5	-5,8	86,7	120	72,9	2,08	17,36
Two	Three	Closed	78,9	19,7	81,3	80	101,6	3,71	7,12
Two	Four	Closed	90	15,4	91,3	100	91,3	4,66	9,94
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-13,3	66	67,3	120	58,3	0,91	-2,5
Three	Four	Closed	58,2	-32,8	66,8	100	66,8	0,47	-0,45
Four	Five	Closed	154,6	143,1	210,6	60	351	38,39	112,08
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-24,5	-9,2	26,2	110	23,8	0,51	-3,68
Eight	Six	Closed	146,6	24,8	148,7	250	59,5	4,09	40,86
Six	Ten	Closed	2,8	1,6	3,2	120	2,7	0	0,02
Ten	Seven	Closed	-26,9	-9,5	28,6	70	40,8	0,62	-3,35
Eight	Nine	Closed	6,3	26,5	27,2	120	22,7	0,21	1,03
Nine	Ten	Closed	80	0	80	200	40	3,2	22,41

Tabla 31. Salida de operación de la línea 4-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	72,2	-3,7	72,3	200	36,1	0,95	-0,88
One	Three	Closed	67,9	5	68,1	120	56,8	3,39	4,96
Eight	One	Closed	91	-5,4	91,2	120	76,7	2,31	19,22
Two	Three	Closed	45,7	11,9	47,3	80	59,1	1,27	-0,32
Two	Four	Closed	45,9	7,2	46,5	100	46,5	1,22	-0,51
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-8,9	64,4	65	120	56,5	0,85	-2,68
Three	Four	Closed	-1	-27,7	27,7	100	27,7	0,07	-1,77
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-24,2	-9,3	25,9	110	23,6	0,5	-3,71
Eight	Six	Closed	143	24,2	145,1	250	58	3,89	38,91
Six	Ten	Closed	3,5	1,6	3,9	120	3,2	0	0,03

Ten	Seven	Closed	-27,2	-9,4	28,8	70	41,1	0,63	-3,31
Eight	Nine	Closed	5,3	26,7	27,2	120	22,7	0,21	1,03
Nine	Ten	Closed	78,9	-0,1	78,9	200	39,5	3,12	21,82

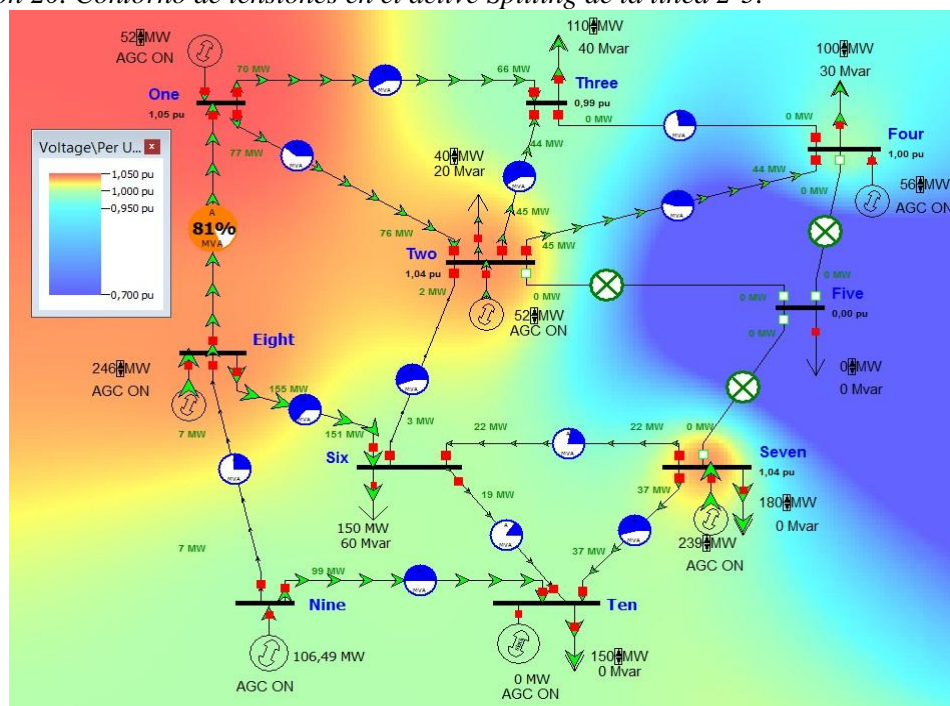
El efecto en cascada condujo a la desconexión de las líneas que alimentar la carga 5, cuando sacan esta carga de operación el sistema sigue funcionando normalmente, pero con un active Splitting, la cargas se pueden observar en la tabla 31.

Tabla 32. Cargas del sistema.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	0	0	0	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

El mapa de contorno de tensiones se puede observar en la ilustración que está a continuación, para concretar la manera en la cual afecto el active Splitting al sistema eléctrico de potencia.

Ilustración 20. Contorno de tensiones en el active Splitting de la línea 2-5.



Prueba en la línea 2-6

Ilustración 21. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 2-6.

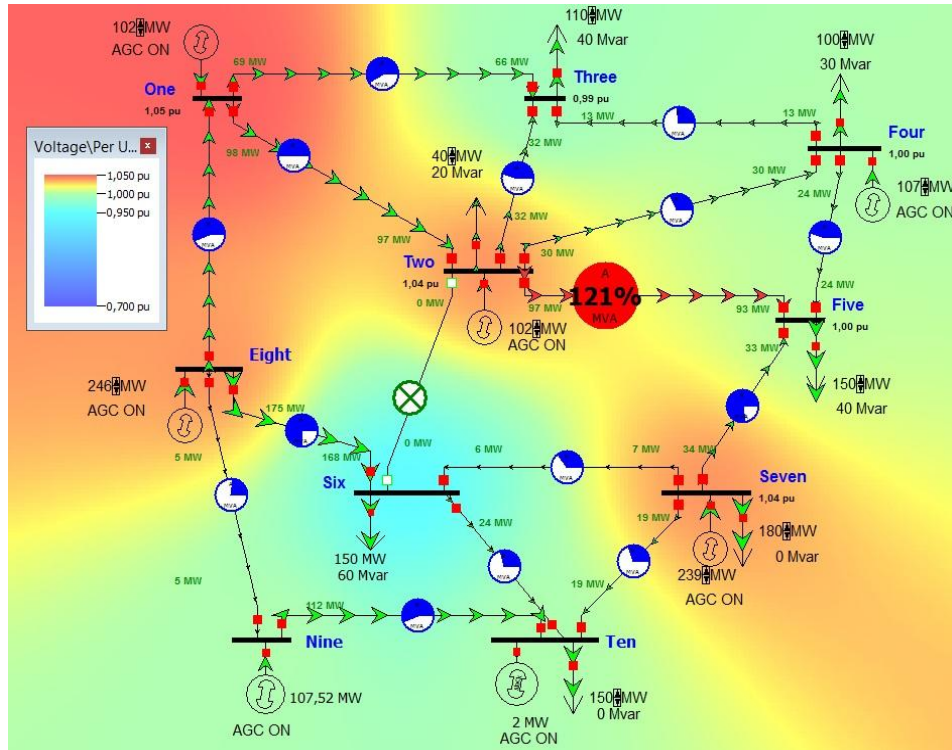


Tabla 33. Desconexión de la línea 2-6.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	94,3	-5,3	94,5	200	47,2	1,61	3,14
One	Three	Closed	67,6	5	67,8	120	56,5	3,36	4,87
Eight	One	Closed	60,8	-7,1	61,2	120	51,5	1,04	8,67
Two	Three	Closed	32,4	15,4	35,8	80	45	0,75	-1,88
Two	Four	Closed	30,1	11,5	32,2	100	32,6	0,6	-2,35
Two	Five	Closed	92,5	3,8	92,5	80	115,7	3,17	6,39
Two	Six	Open	0	0	0	120	0	0	0
Three	Four	Closed	-14,1	-22,6	26,7	100	26,7	0,07	-1,78
Four	Five	Closed	22,4	-10,8	24,9	60	41,5	0,46	-3,65
Seven	Five	Closed	39,5	47,8	62	80	78,8	0,75	-1,93
Six	Seven	Closed	-4,5	-35,8	36,1	110	32,8	1,01	-1,93
Eight	Six	Closed	161,6	55,1	170,8	250	68,3	5,39	53,92
Six	Ten	Closed	10,7	-23	25,4	120	22,2	0	1,42
Ten	Seven	Closed	-7,5	-16,7	18,3	70	26,1	0,21	-4,59
Eight	Nine	Closed	17	24,4	29,8	120	24,8	0,25	1,23
Nine	Ten	Closed	91,8	1,9	91,8	200	45,9	4,21	29,5

La desconexión de la línea 2-6 genera sobrecarga en otra línea del sistema, por lo que debe salir de operación, estos conlleva a un efecto en cascada, como se puede apreciar en las siguientes tablas.

Tabla 34. Salida de operación de la línea 2-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	59,5	-2,5	59,5	200	29,8	0,64	-2,7
One	Three	Closed	72,8	4,4	73	120	60,8	3,89	6,44
Eight	One	Closed	28,6	-6,6	29,3	120	24,7	0,24	1,99
Two	Three	Closed	59,6	8,8	60,3	80	75,4	2,04	1,99
Two	Four	Closed	63,1	3,2	63,2	100	63,2	2,22	2,51
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Open	0	0	0	120	0	0	0
Three	Four	Closed	16,5	-35,2	38,9	100	38,9	0,15	-1,54
Four	Five	Closed	86,2	-14,9	87,5	60	145,8	6,07	13,27
Seven	Five	Closed	71,8	69,8	100,2	80	125,2	1,91	1,63
Six	Seven	Closed	12,8	-42,2	44,1	110	40,1	1,57	-0,23
Eight	Six	Closed	184	63	194,5	250	77,8	7	69,96
Six	Ten	Closed	14,3	-24,7	28,6	120	25,1	0	1,82
Ten	Seven	Closed	8,1	-21,6	23,1	70	33	0,35	-4,17
Eight	Nine	Closed	27	22,7	35,3	120	29,4	0,35	1,73
Nine	Ten	Closed	103,1	4,3	103,2	200	51,6	5,32	37,27

Tabla 35. Salida de operación de la línea 4-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	10,4	3,8	11	200	7,2	0,03	-6,38
One	Three	Closed	34,9	11,7	36,8	120	30,7	1,04	-2,11
Eight	One	Closed	-55,1	6	55,4	120	46,6	0,85	7,1
Two	Three	Closed	39,1	13,1	41,2	80	51,5	0,98	-1,21
Two	Four	Closed	32,6	10,8	34,3	100	34,4	0,68	-2,12
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Open	0	0	0	120	0	0	0
Three	Four	Closed	-38	-11,9	39,8	100	39,8	0,16	-1,51
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Closed	155	50,8	163,1	80	203,8	4,96	10,78

Six	Seven	Closed	58,2	-57,8	82	110	80,2	6,04	13,27
Eight	Six	Closed	243,4	95,1	261,3	250	104,5	12,63	126,3
Six	Ten	Closed	22,6	-33,4	40,3	120	36,2	0	3,78
Ten	Seven	Closed	52,1	-32,1	61,2	70	87,4	2,87	3,41
Eight	Nine	Closed	52,1	19	55,5	120	46,2	0,85	4,27
Nine	Ten	Closed	135,4	13,7	136	200	68	9,25	64,78

Tabla 36. Salida de operación de la línea 7-5.

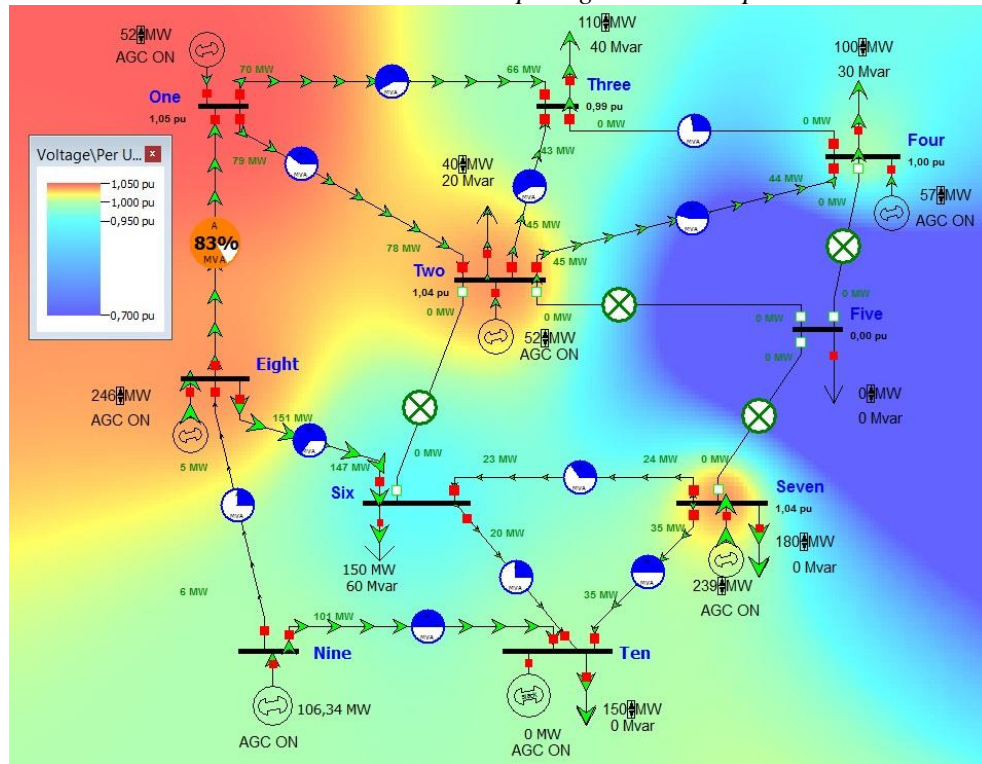
From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	78,9	-4,3	79	200	39,5	1,13	0,22
One	Three	Closed	70,1	4,7	70,2	120	58,5	3,6	5,59
Eight	One	Closed	100,1	-4,4	100,2	120	84,3	2,78	23,2
Two	Three	Closed	44,6	12,2	46,2	80	57,8	1,22	-0,48
Two	Four	Closed	44,8	7,5	45,5	100	45,5	1,17	-0,66
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Open	0	0	0	120	0	0	0
Three	Four	Closed	-0,2	-28,2	28,2	100	28,2	0,08	-1,76
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-25,3	-27,6	37,4	110	34	1,12	-1,61
Eight	Six	Closed	134,6	48,4	143	250	57,2	3,78	37,84
Six	Ten	Closed	6,1	-21,8	22,6	120	19,8	0	1,13
Ten	Seven	Closed	-25,6	-10	27,5	70	39,3	0,57	-3,49
Eight	Nine	Closed	4,7	26,8	27,2	120	22,7	0,21	1,03
Nine	Ten	Closed	78,5	-0,2	78,5	200	39,2	3,08	21,55

Con la salida de operación de la línea 7-5, producto del efecto en cascada se genera un active Splitting, a división generada saca la carga 5 de operación y deja el resto del sistema funcionando correctamente.

Tabla 37. Cargas del sistema.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	0	0	0	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Ilustración 22. Contorno de tensiones en el active Splitting ocasionado por la línea 2-6.



Prueba en la línea 3-4

La salida de operación de la línea 3-4 no ocasiona contingencia en el sistema, ya que este sigue funcionando normalmente con la ausencia de esta misma, como se puede evidenciar en las tablas 37 y 38.

Tabla 38. Desconexión de la línea 3-4.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	99,6	-5,6	99,8	200	49,9	1,8	4,26
One	Three	Closed	75,1	17,3	77,1	120	64,2	4,38	8,09
Eight	One	Closed	73,6	-6,6	73,9	120	62,2	1,51	12,62
Two	Three	Closed	40,8	31,4	51,5	80	64,4	1,55	0,65
Two	Four	Closed	15,3	15,9	22,1	100	24,3	0,31	-3,23
Two	Five	Closed	70,4	8,5	70,9	80	88,6	1,87	2,48
Two	Six	Closed	33,9	53,1	63	120	54,2	0,79	-2,84
Three	Four	Open	0	0	0	100	0	0	0
Four	Five	Closed	22,6	-11	25,2	60	42	0,47	-3,62
Seven	Five	Closed	60,3	40,3	72,5	80	90,6	1,01	-1,16
Six	Seven	Closed	11,6	-22,1	25	110	22,7	0,41	-3,97

Eight	Six	Closed	151,6	26,7	153,9	250	61,6	4,38	43,82
Six	Ten	Closed	18,7	1	18,8	120	15,6	0	0,7
Ten	Seven	Closed	-3,3	-18,1	18,4	70	26,2	0,2	-4,6
Eight	Nine	Closed	14,2	24,9	28,7	120	23,9	0,23	1,14
Nine	Ten	Closed	88,5	1,3	88,5	200	44,3	3,92	27,41

Tabla 39. Tensiones con la salida de la línea 3-4.

Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
One	138	1,05	144,9	6,78			186,3	23,89
Two	138	1,04	143,52	-2,92	40	20	50,21	153,21
Three	138	0,9573	132,112	-4,55	110	40		
Four	138	1	138	-5,91	100	30	80,19	9,25
Five	138	1,0041	138,569	-8,08	150	40		
Six	138	1,004	138,552	-2,78	150	60		
Seven	138	1,04	143,52	-6,61	180	0	192,14	86,45
Eight	138	1,04	143,52	14,24			198,92	49,33
Nine	138	1	138	15,77			99,98	-27,81
Ten	138	1	138	-2	150	0	100,1	-3,09

Prueba en la línea 4-5

Ilustración 23. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 4-5.

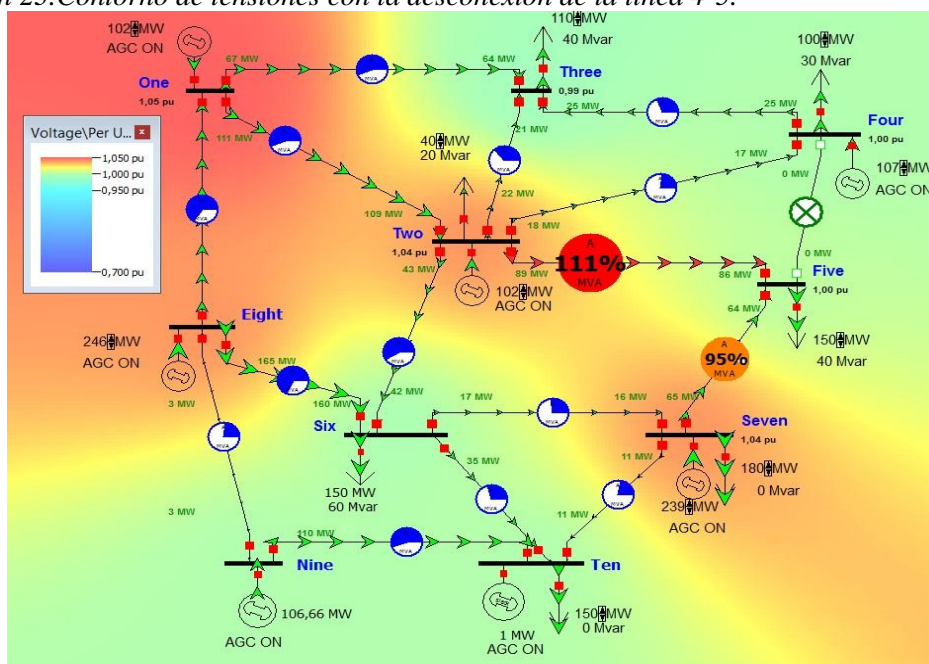


Tabla 40. Desconexión de la línea 4-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	105,9	-6	106,1	200	53,1	2,04	5,67
One	Three	Closed	65,5	5,3	65,8	120	54,8	3,16	4,27
Eight	One	Closed	70,7	-6,8	71	120	59,8	1,4	11,66
Two	Three	Closed	22,9	18,1	29,2	80	38	0,52	-2,58
Two	Four	Closed	18,6	14,9	23,8	100	25,6	0,35	-3,11
Two	Five	Closed	86	5,3	86,1	80	107,7	2,75	5,12
Two	Six	Closed	38,7	52,2	65	120	55,6	0,83	-2,71
Three	Four	Closed	-25,3	-18,4	31,2	100	31,2	0,1	-1,7
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Closed	67,9	39,1	78,4	80	98	1,17	-0,67
Six	Seven	Closed	16,2	-23,6	28,6	110	26	0,56	-3,52
Eight	Six	Closed	153,2	27,2	155,6	250	62,3	4,48	44,79
Six	Ten	Closed	20,4	0,9	20,5	120	17,1	0	0,84
Ten	Seven	Closed	-0,1	-19,1	19,1	70	27,3	0,22	-4,54
Eight	Nine	Closed	15,5	24,7	29,2	120	24,3	0,24	1,18
Nine	Ten	Closed	89,8	1,6	89,8	200	44,9	4,04	28,25

La desconexión de la línea 4-5 genera una sobrecarga en otra línea del sistema, lo que por operación de las protecciones ocasiona su salida del sistema, esto conlleva a un efecto en cadena como se puede observar en las siguientes tablas.

Tabla 41. Salida de operación de la línea 2-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	97,5	-5,5	97,6	200	48,8	1,72	3,8
One	Three	Closed	62,8	5,7	63	120	52,5	2,91	3,52
Eight	One	Closed	59,1	-7,1	59,5	120	50	0,98	8,18
Two	Three	Closed	24,3	17,6	30	80	38,9	0,54	-2,5
Two	Four	Closed	19,7	14,5	24,5	100	26,2	0,37	-3,05
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	114	41,2	121,2	120	101	2,76	3,1
Three	Four	Closed	-26,4	-17,7	31,8	100	31,8	0,1	-1,69
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Closed	155	50,8	163,1	80	203,8	4,96	10,78
Six	Seven	Closed	71,2	-37,1	80,3	110	73,8	5,07	10,03
Eight	Six	Closed	157,4	31,5	160,6	250	64,2	4,77	47,6

									7
Six	Ten	Closed	42,7	-0,9	42,7	120	35,8	0	3,69
Ten	Seven	Closed	37,5	-29,2	47,5	70	67,8	1,69	-0,13
Eight	Nine	Closed	23,4	23,3	33	120	27,5	0,3	1,51
Nine	Ten	Closed	101,8	4	101,8	200	50,9	5,18	36,2
									9

Tabla 42. Salida de operación de la línea 7-5.

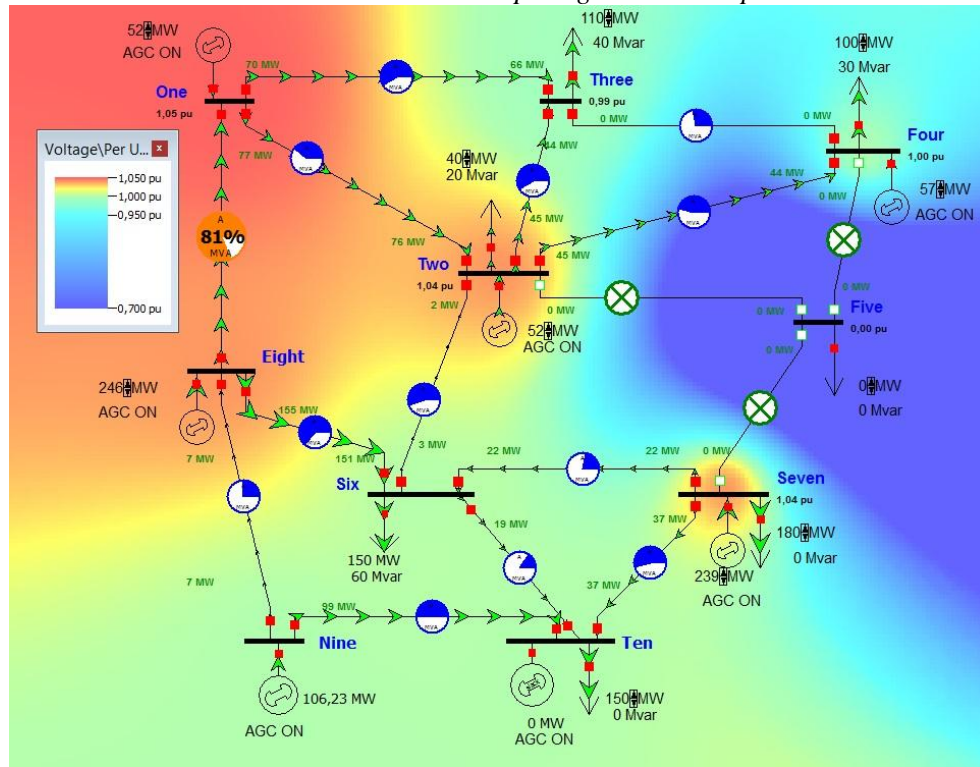
From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	72,2	-3,7	72,3	200	36,2	0,95	-0,87
One	Three	Closed	67,9	5	68,1	120	56,8	3,39	4,96
Eight	One	Closed	91	-5,4	91,2	120	76,7	2,31	19,23
Two	Three	Closed	45,7	11,9	47,2	80	59,1	1,27	-0,32
Two	Four	Closed	45,9	7,2	46,4	100	46,4	1,22	-0,51
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-8,9	64,4	65	120	56,5	0,85	-2,68
Three	Four	Closed	-1	-27,7	27,7	100	27,7	0,07	-1,77
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-24,2	-9,3	25,9	110	23,6	0,5	-3,72
Eight	Six	Closed	143,1	24,2	145,1	250	58	3,89	38,94
Six	Ten	Closed	3,7	1,6	4	120	3,3	0	0,03
Ten	Seven	Closed	-27,3	-9,4	28,8	70	41,2	0,63	-3,3
Eight	Nine	Closed	5,2	26,7	27,2	120	22,7	0,2	1,02
Nine	Ten	Closed	79,1	-0,1	79,1	200	39,5	3,13	21,88

El efecto en cascada anteriormente mencionado ocasionó un active Splitting, el sistema se alivió cuando se saca de operación la carga número 5, como se puede ver en la tabla 44 y el mapa de contorno de tensiones correspondiente es el que se puede observar en la ilustración 24.

Tabla 43. Cargas del sistema.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	0	0	0	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Ilustración 24. Contorno de tensiones en el active Splitting ocasionado por la línea 4-5.



Prueba en la línea 7-5

Ilustración 25. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 7-5.

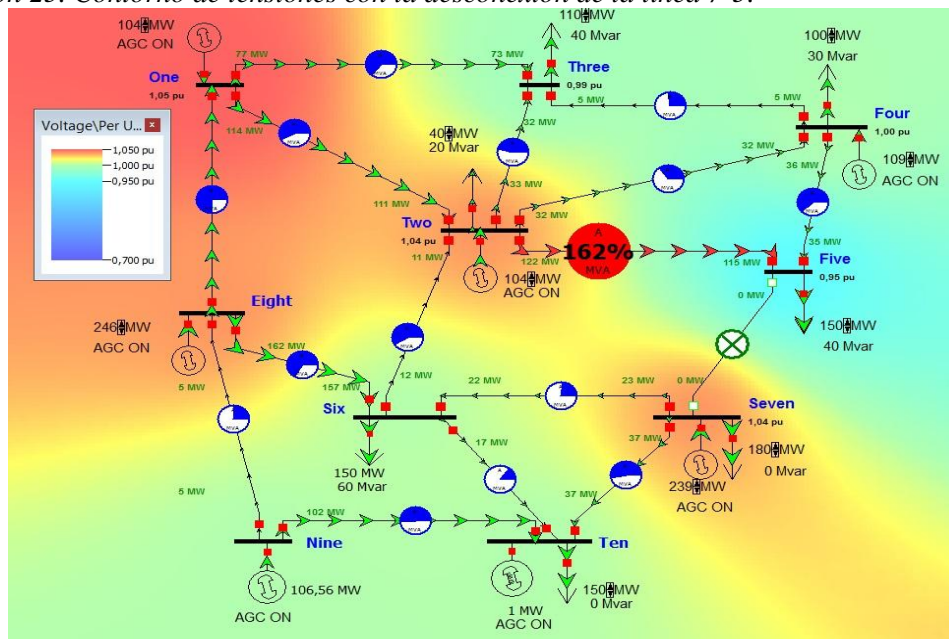


Tabla 44. Desconexión de la línea 7-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	108,9	-6,1	109,1	200	54,5	2,15	6,36
One	Three	Closed	75,3	3,8	75,4	120	62,9	4,15	7,24
Eight	One	Closed	82	-6,1	82,3	120	69,2	1,88	15,64
Two	Three	Closed	33,8	15,2	37	80	46,3	0,8	-1,73
Two	Four	Closed	33	10,7	34,7	100	34,7	0,7	-2,08
Two	Five	Closed	122	45,5	130,2	80	162,7	6,32	16
Two	Six	Closed	-18	67,7	70,1	120	60,5	0,98	-2,29
Three	Four	Closed	-5,8	-26,5	27,1	100	27,1	0,07	-1,77
Four	Five	Closed	35,5	9,1	36,6	60	61	1,11	-1,4
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-24,9	-9	26,5	110	24,1	0,53	-3,64
Eight	Six	Closed	150,3	25,5	152,5	250	61	4,3	42,98
Six	Ten	Closed	1,9	1,6	2,5	120	2,1	0	0,01
Ten	Seven	Closed	-26,6	-9,6	28,3	70	40,4	0,61	-3,38
Eight	Nine	Closed	7,1	26,3	27,3	120	22,7	0,21	1,03
Nine	Ten	Closed	81,3	0,2	81,3	200	40,6	3,3	23,12

La desconexión de la línea 7-5 genera una sobrecarga en otra línea del sistema, lo que a su vez genera más sobrecargas al salir de operación del sistema, como se puede observar en los siguientes cuadros, la contingencia genera un efecto en cascada.

Tabla 45. Salida de operación de la línea 2-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	90,4	-5,1	90,6	200	45,3	1,48	2,35
One	Three	Closed	100,6	12	101,3	120	84,4	7,5	17,42
Eight	One	Closed	86,6	-5,8	86,8	120	73	2,09	17,41
Two	Three	Closed	78,9	19,7	81,3	80	101,6	3,72	7,13
Two	Four	Closed	90	15,4	91,3	100	91,3	4,66	9,95
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-13,5	66,1	67,4	120	58,4	0,91	-2,5
Three	Four	Closed	58,3	-32,8	66,9	100	66,9	0,47	-0,45
Four	Five	Closed	154,6	143,1	210,7	60	351,1	38,4	112,1
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-24,5	-9,1	26,2	110	23,8	0,51	-3,68
Eight	Six	Closed	146,7	24,8	148,8	250	59,5	4,09	40,92
Six	Ten	Closed	2,7	1,6	3,2	120	2,6	0	0,02
Ten	Seven	Closed	-26,9	-9,5	28,6	70	40,8	0,62	-3,35
Eight	Nine	Closed	6,2	26,5	27,2	120	22,7	0,21	1,03

Nine	Ten	Closed	80,1	0	80,1	200	40,1	3,21	22,47
-------------	-----	--------	------	---	------	-----	------	------	-------

Tabla 46. Salida de operación de la línea 4-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	72,2	-3,7	72,3	200	36,2	0,95	-0,87
One	Three	Closed	67,9	5	68,1	120	56,8	3,39	4,97
Eight	One	Closed	91,1	-5,4	91,2	120	76,7	2,31	19,23
Two	Three	Closed	45,7	11,9	47,3	80	59,1	1,27	-0,32
Two	Four	Closed	45,9	7,2	46,5	100	46,5	1,22	-0,51
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-8,9	64,4	65	120	56,5	0,85	-2,68
Three	Four	Closed	-1	-27,7	27,7	100	27,7	0,07	-1,77
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-24,2	-9,3	25,9	110	23,6	0,5	-3,71
Eight	Six	Closed	143,1	24,2	145,1	250	58	3,89	38,94
Six	Ten	Closed	3,6	1,6	4	120	3,3	0	0,03
Ten	Seven	Closed	-27,3	-9,4	28,8	70	41,2	0,63	-3,31
Eight	Nine	Closed	5,2	26,7	27,2	120	22,7	0,21	1,03
Nine	Ten	Closed	79	-0,1	79	200	39,5	3,12	21,87

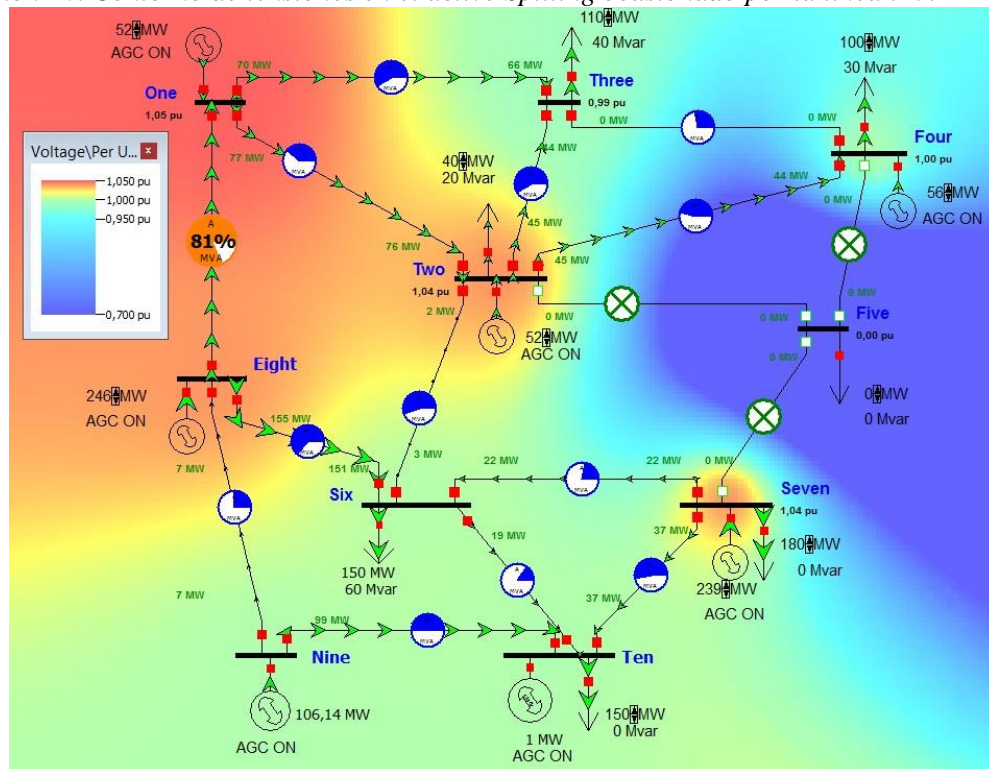
Con la salida de la última línea del efecto en cascada que es la línea 4-5 se desconecta la carga número 5, quedando el sistema en estado de active Spliting, como se puede ver en la tabla 48, las demás cargas siguen operando con normalidad.

Tabla 47. Cargas del sistema.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	0	0	0	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Las tensiones con que queda trabajando el sistema después del active Spliting son las que se pueden observar en el siguiente mapa de contorno de tensiones.

Ilustración 26. Contorno de tensiones en el active Splitting ocasionado por la línea 7-5.



Prueba de la línea 6-7

Ilustración 27. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 6-7.

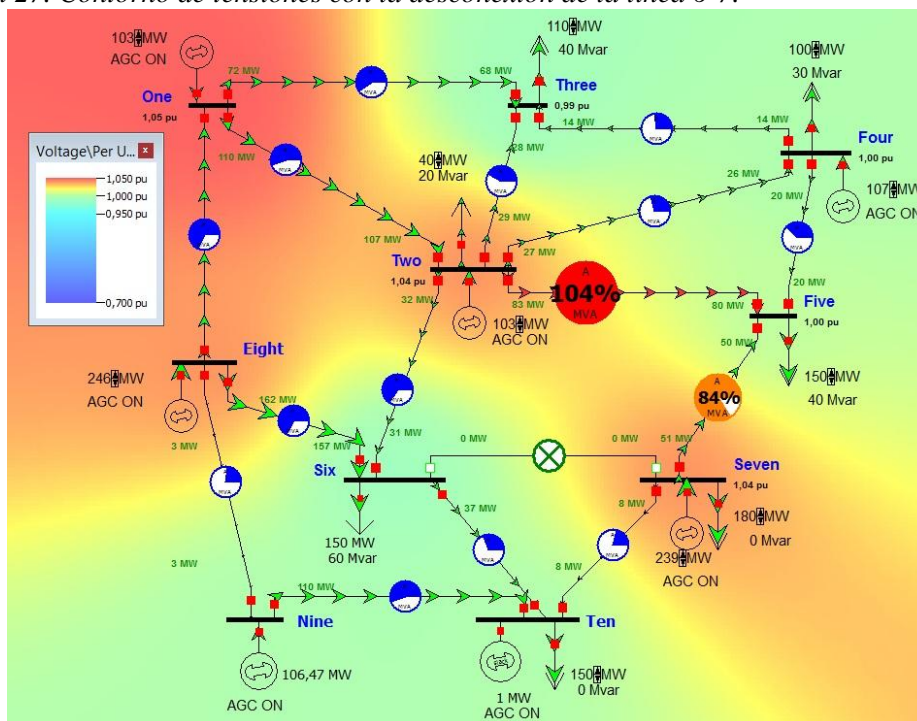


Tabla 48. Desconexión de la línea 6-7.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	104,3	-5,9	104,5	200	52,2	1,98	5,3
One	Three	Closed	69,9	4,6	70,1	120	58,4	3,59	5,55
Eight	One	Closed	73,6	-6,6	73,9	120	62,2	1,51	12,61
Two	Three	Closed	29,5	16,2	33,7	80	42,7	0,67	-2,12
Two	Four	Closed	27,1	12,4	29,7	100	30,5	0,52	-2,59
Two	Five	Closed	80,2	6,2	80,5	80	100,6	2,4	4,07
Two	Six	Closed	27,8	68,4	73,8	120	62,7	1,08	-1,94
Three	Four	Closed	-14,8	-22,6	27	100	27	0,07	-1,77
Four	Five	Closed	18,8	-9,9	21,2	60	35,4	0,33	-4,04
Seven	Five	Closed	54,7	42,3	69,1	80	86,6	0,92	-1,43
Six	Seven	Open	0	0	0	110	0	0	0
Eight	Six	Closed	150,2	30,5	153,3	250	61,3	4,34	43,45
Six	Ten	Closed	22,6	-2,6	22,7	120	19,1	0	1,05
Ten	Seven	Closed	2,3	-19,8	20	70	28,5	0,24	-4,47
Eight	Nine	Closed	15,6	24,7	29,2	120	24,3	0,24	1,18
Nine	Ten	Closed	89,8	1,6	89,8	200	44,9	4,03	28,23

La desconexión de la línea 6-7 del sistema genera sobrecarga en otra línea, la que también sale de operación y provoca un efecto en cascada.

Tabla 49. salida de operación de la línea 2-5

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	92,6	-5,2	92,7	200	46,4	1,56	2,78
One	Three	Closed	78,9	3,5	79	120	65,8	4,55	8,43
Eight	One	Closed	69,1	-6,8	69,4	120	58,4	1,34	11,14
Two	Three	Closed	48	11,6	49,4	80	61,7	1,38	0,02
Two	Four	Closed	50,3	6,1	50,7	100	50,7	1,44	0,17
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	56,4	66,1	87	120	72,5	1,47	-0,76
Three	Four	Closed	11	-33,3	35,1	100	35,1	0,12	-1,63
Four	Five	Closed	68,5	-13,4	69,8	60	116,3	3,85	6,61
Seven	Five	Closed	87,5	62,4	107,5	80	134,4	2,19	2,46
Six	Seven	Open	0	0	0	110	0	0	0
Eight	Six	Closed	146,7	31,9	150,1	250	60	4,17	41,66
Six	Ten	Closed	47,5	-2,8	47,6	120	40,1	0	4,62
Ten	Seven	Closed	36,4	-28,9	46,5	70	66,5	1,62	-0,34
Eight	Nine	Closed	23,8	23,2	33,2	120	27,7	0,31	1,53

Nine	Ten	Closed	98,7	3,3	98,8	200	49,4	4,88	34,16
-------------	-----	--------	------	-----	------	-----	------	------	-------

Tabla 50. salida de operación de la línea 7-5

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	92,3	-5,2	92,4	200	46,2	1,55	2,72
One	Three	Closed	101,2	12	101,9	120	84,9	7,58	17,66
Eight	One	Closed	89	-5,5	89,2	120	75	2,21	18,38
Two	Three	Closed	78,5	19,8	81	80	101,2	3,69	7,04
Two	Four	Closed	89,7	15,4	91	100	91	4,63	9,86
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-10,8	72,9	73,7	120	63,2	1,08	-1,96
Three	Four	Closed	58,4	-32,9	67,1	100	67,1	0,48	-0,44
Four	Five	Closed	154,6	143,1	210,6	60	351	38,39	112,08
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Open	0	0	0	110	0	0	0
Eight	Six	Closed	150,2	27,8	152,8	250	61,1	4,31	43,15
Six	Ten	Closed	-16	-0,4	16	120	13,4	0	0,52
Ten	Seven	Closed	-50,6	0,8	50,6	70	75,2	2,05	0,96
Eight	Nine	Closed	0,2	27,7	27,7	120	23,1	0,21	1,07
Nine	Ten	Closed	74,3	-0,8	74,3	200	37,1	2,76	19,31

Tabla 51. Salida de operación de la línea 4-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	74	-3,9	74,1	200	37,1	0,99	-0,58
One	Three	Closed	68,5	4,9	68,7	120	57,2	3,45	5,13
Eight	One	Closed	93,5	-5,1	93,7	120	78,8	2,43	20,27
Two	Three	Closed	45,4	12	47	80	58,7	1,25	-0,37
Two	Four	Closed	45,6	7,3	46,2	100	46,2	1,2	-0,55
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-6,5	71,4	71,7	120	61,6	1,02	-2,13
Three	Four	Closed	-0,8	-27,9	27,9	100	27,9	0,07	-1,76
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Open	0	0	0	110	0	0	0
Eight	Six	Closed	146,6	27,2	149,1	250	59,6	4,11	41,11
Six	Ten	Closed	-15	-0,4	15	120	12,5	0	0,45
Ten	Seven	Closed	-50,6	0,8	50,6	70	75,2	2,05	0,96
Eight	Nine	Closed	-0,7	27,9	27,9	120	23,3	0,22	1,08

Nine	Ten	Closed	73,3	-0,9	73,3	200	36,6	2,69	18,8
-------------	-----	--------	------	------	------	-----	------	------	------

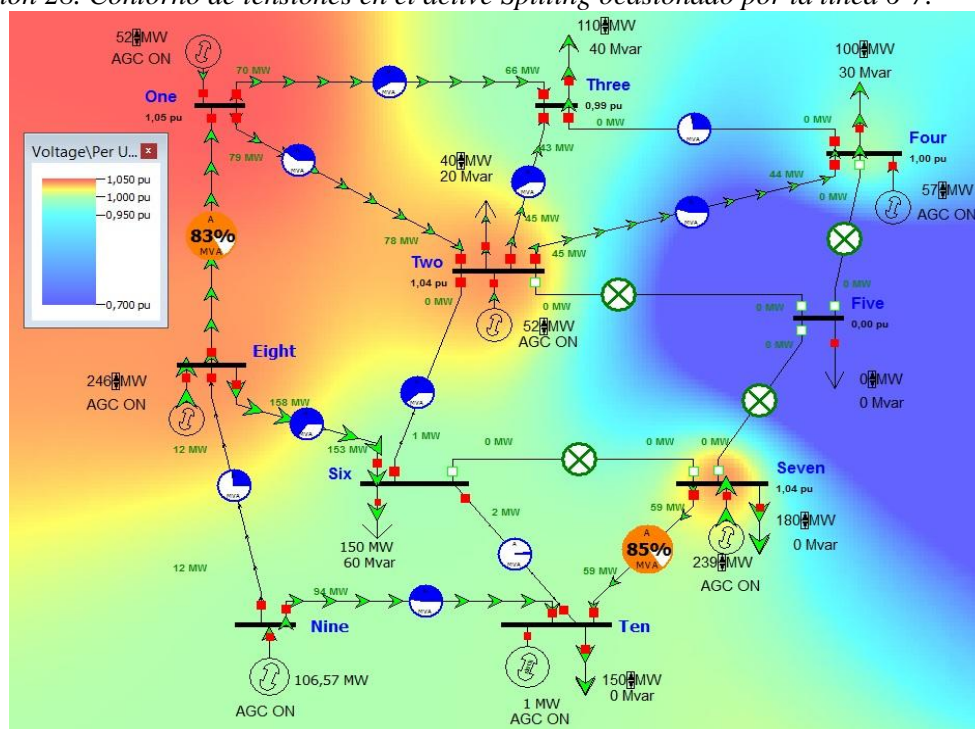
Cuando la línea 4-5 sale de operación, producto del efecto en cascada, el sistema queda en estado de active Spliting, se acaba el efecto en cascada y el sistema vuelve a su funcionamiento normal pero queda dividido, la sucesión de efectos conllevó a que la carga número 5 quedara sin alimentación, como se puede observar en la tabla 53.

Tabla 52. Cargas del sistema.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	0	0	0	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Las tensiones con las que continua operando el sistema después del active Spliting son las que se observan en el mapa de contorno de tensiones de la siguiente ilustración.

Ilustración 28. Contorno de tensiones en el active Spliting ocasionado por la línea 6-7.



Prueba en la línea 8-6

Tabla 53. Desconexión de la línea 8-6.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	175,5	-6,6	175,7	200	87,8	5,59	27
One	Three	Closed	93,5	1,8	93,5	120	77,9	6,35	13,85
Eight	One	Closed	170,7	9,6	170,9	120	143,8	8,1	67,53
Two	Three	Closed	18,3	20,2	27,2	80	36,3	0,46	-2,74
Two	Four	Closed	17,5	15,2	23,2	100	25,2	0,34	-3,15
Two	Five	Closed	75,4	7,3	75,8	80	94,7	2,13	3,26
Two	Six	Closed	125,2	41,6	131,9	120	109,9	3,26	4,61
Three	Four	Closed	-5,1	-29,2	29,6	100	29,6	0,08	-1,73
Four	Five	Closed	23,4	-11,2	26	60	43,3	0,5	-3,52
Seven	Five	Closed	54,7	42,2	69,1	80	86,6	0,92	-1,43
Six	Seven	Closed	-7,4	-19,7	21	110	19,1	0,28	-4,31
Eight	Six	Open	0	0	0	250	0	0	0
Six	Ten	Closed	-20,7	-3,3	21	120	17,6	0	0,89
Ten	Seven	Closed	9,9	-22,1	24,2	70	34,6	0,39	-4,04
Eight	Nine	Closed	69	17	71,1	120	59,2	1,4	7,01
Nine	Ten	Closed	144,7	17,2	145,7	200	72,8	10,61	74,29

Las tensiones de operación del sistema con la desconexión de la línea 8-6 son las que se observan en la siguiente ilustración.

Ilustración 29. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 8-6.

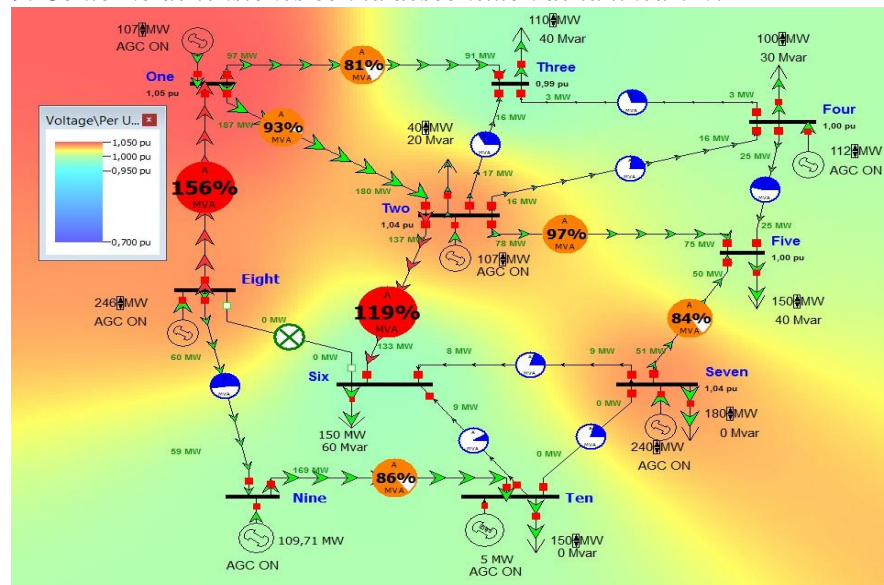
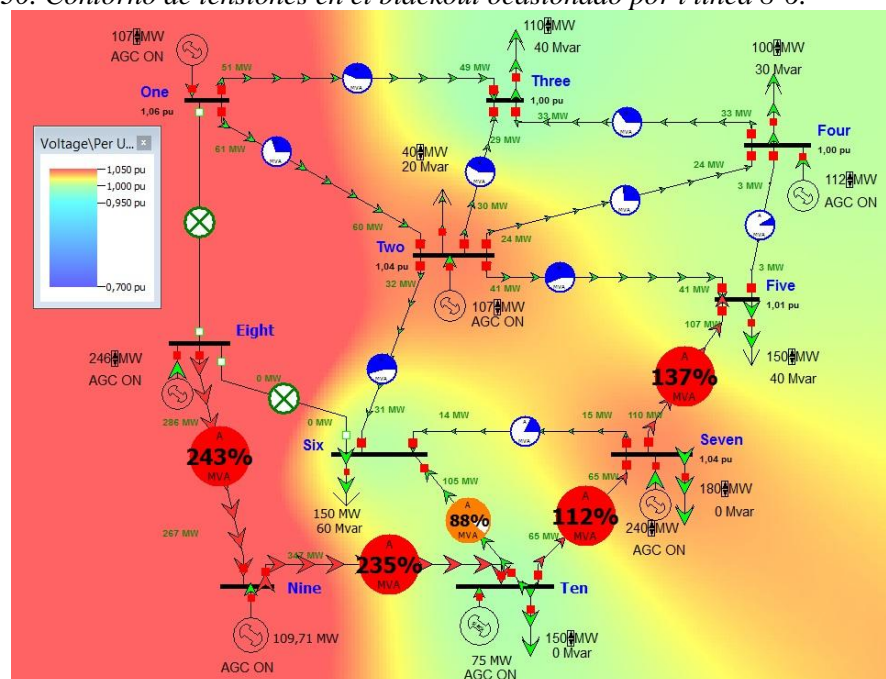


Tabla 54. Salida de operación de la línea 8-1.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	57,2	-2,3	57,3	200	28,6	0,59	-2,99
One	Three	Closed	49,2	8,3	49,9	120	41,6	1,85	0,32
Eight	One	Open	0	0	0	120	0	0	0
Two	Three	Closed	30,2	15,7	34	80	43	0,68	-2,09
Two	Four	Closed	24,5	13,1	27,8	100	28,8	0,46	-2,78
Two	Five	Closed	41,3	16,2	44,4	80	55,5	0,75	-0,89
Two	Six	Closed	27,1	55,7	62	120	53,6	0,77	-2,91
Three	Four	Closed	-33,2	-14,2	36,1	100	36,1	0,13	-1,6
Four	Five	Closed	2,1	-5	5,5	60	9,1	0,01	-5
Seven	Five	Closed	109,6	25,9	112,7	80	140,8	2,37	2,92
Six	Seven	Closed	-13,2	-14,3	19,4	110	17,6	0,25	-4,46
Eight	Six	Open	0	0	0	250	0	0	0
Six	Ten	Closed	-110,5	12,9	111,3	120	92,7	0	24,71
Ten	Seven	Closed	75,6	-35,6	83,6	70	120,5	5,45	11,15
Eight	Nine	Closed	243,2	55	249,3	120	207,8	16,38	81,9
Nine	Ten	Closed	302,5	186,3	355,2	200	181,7	66,03	462,23

Al desconectar la línea 8-6 se genera una sobrecarga inmediata en la línea 8-1 y 2-6, al ser la línea 8-1 la más sobrecarga sales primero del sistema por operación de las protecciones, este evento genera rápidamente un blackout, las tensiones del blackout se pueden ver en la ilustración número 30.

Ilustración 30. Contorno de tensiones en el blackout ocasionado por l línea 8-6.



Prueba de la línea 6-10

Tabla 55. Desconexión de la línea 6-10.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	102	-5,8	102,2	200	51,1	1,89	4,79
One	Three	Closed	69	4,7	69,2	120	57,7	3,5	5,28
Eight	One	Closed	70,3	-6,8	70,6	120	59,4	1,38	11,52
Two	Three	Closed	29,7	16,2	33,8	80	42,8	0,67	-2,11
Two	Four	Closed	27,1	12,3	29,8	100	30,5	0,52	-2,59
Two	Five	Closed	79,2	6,4	79,5	80	99,4	2,35	3,9
Two	Six	Closed	26,3	50,6	57	120	49,7	0,65	-3,27
Three	Four	Closed	-15,5	-22,3	27,1	100	27,1	0,07	-1,77
Four	Five	Closed	18,3	-9,8	20,7	60	34,5	0,31	-4,09
Seven	Five	Closed	56,1	41,8	70	80	87,6	0,94	-1,36
Six	Seven	Closed	19	-23	29,8	110	27,1	0,62	-3,37
Eight	Six	Closed	147,3	24,4	149,4	250	59,7	4,12	41,25
Six	Ten	Open	0	0	0	120	0	0	0
Ten	Seven	Closed	-14,6	-14,2	20,3	70	29	0,28	-4,37
Eight	Nine	Closed	21,8	23,6	32,1	120	26,8	0,29	1,43
Nine	Ten	Closed	95,8	2,7	95,8	200	47,9	4,59	32,15

Al desconectar la línea 6-10 del sistema de potencia no hay contingencia alguna ya que el sistema sigue funcionando de manera estable, evidenciando que la línea no es crítica para el sistema. Las tensiones permanecen estables también como se puede observar en la tabla 58.

Tabla 56. Tensiones con la desconexión de la línea 6-10.

Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
One	138	1,05	144,9	5,95			186,3	24,05
Two	138	1,04	143,52	-3,78	40	20	50,21	153,2
Three	138	0,9573	132,109	-5,4	110	40		
Four	138	1	138	-6,72	100	30	80,19	9,18
Five	138	1,0042	138,575	-8,81	150	40		
Six	138	1,0039	138,539	-3,74	150	60		
Seven	138	1,04	143,52	-7,26	180	0	192,14	86,75
Eight	138	1,04	143,52	13,49			198,92	50,36
Nine	138	1	138	15,24			99,98	-28,7
Ten	138	1	138	-2	150	0	100,15	-3,36

Prueba en la línea 10-7

Tabla 57. Desconexión de la línea 10-7.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	103,5	-5,9	103,7	200	51,8	1,95	5,12
One	Three	Closed	69	4,7	69,2	120	57,6	3,5	5,27
Eight	One	Closed	71,7	-6,7	72,1	120	60,6	1,44	12
Two	Three	Closed	28,7	16,4	33,1	80	42,1	0,65	-2,18
Two	Four	Closed	26	12,7	28,9	100	29,8	0,5	-2,67
Two	Five	Closed	73,3	7,7	73,7	80	92,1	2,02	2,92
Two	Six	Closed	35,7	53,1	64	120	54,9	0,81	-2,77
Three	Four	Closed	-16,4	-21,9	27,4	100	27,4	0,07	-1,77
Four	Five	Closed	16,2	-9,3	18,7	60	31,2	0,25	-4,28
Seven	Five	Closed	63,8	39,2	74,9	80	93,6	1,07	-0,97
Six	Seven	Closed	11,6	-22,3	25,1	110	22,9	0,42	-3,95
Eight	Six	Closed	152,2	27	154,5	250	61,8	4,42	44,16
Six	Ten	Closed	21	0,9	21,1	120	17,5	0	0,88
Ten	Seven	Open	0	0	0	70	0	0	0
Eight	Nine	Closed	15,5	24,7	29,2	120	24,3	0,24	1,18
Nine	Ten	Closed	89,6	1,5	89,6	200	44,8	4,01	28,08

Cuando se desconecta la línea 10-7 del sistema no hay contingencia alguna, ya que ésta no genera sobrecargas ni desconexión de ningún otro elemento del sistema. Evidenciando así que la línea 10-7 no es una línea crítica para el sistema; las tensiones se pueden verificar en la siguiente tabla.

Tabla 58. Tensiones con la desconexión de la línea 10-7.

Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
One	138	1,05	144,9	4,34			186,67	24,79
Two	138	1,04	143,52	-5,55	40	20	50,58	152,28
Three	138	0,9572	132,09	-7,1	110	40		
Four	138	1	138	-8,88	100	30	80,57	9,61
Five	138	1,0038	138,519	-11,5	150	40		
Six	138	1,0056	138,765	-5,05	150	60		
Seven	138	1,04	143,52	-10,6	180	0	192,12	71,1
Eight	138	1,04	143,52	12,28			198,91	50,68
Nine	138	1	138	14,37			99,79	-29,99
Ten	138	1	138	-2	150	0	99,55	20,55

Prueba de la línea 8-9

Tabla 59. Desconexión de la línea 8-9.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	107,7	-6,1	107,9	200	54	2,11	6,09
One	Three	Closed	70,8	4,5	70,9	120	59,1	3,67	5,8
Eight	One	Closed	77,8	-6,4	78,1	120	65,7	1,69	14,08
Two	Three	Closed	28,6	16,5	33	80	42	0,65	-2,19
Two	Four	Closed	26,1	12,6	29	100	29,8	0,5	-2,67
Two	Five	Closed	76,8	7	77,1	80	96,4	2,21	3,49
Two	Six	Closed	36,6	54,9	66	120	56,4	0,86	-2,62
Three	Four	Closed	-15	-22,6	27,1	100	27,1	0,07	-1,77
Four	Five	Closed	17,9	-9,7	20,3	60	33,9	0,3	-4,13
Seven	Five	Closed	58,8	40,9	71,6	80	89,5	0,98	-1,23
Six	Seven	Closed	14,4	-23,5	27,6	110	25,1	0,52	-3,64
Eight	Six	Closed	161,6	29,5	164,3	250	65,7	4,99	49,89
Six	Ten	Closed	27,9	0,7	27,9	120	23,3	0	1,56
Ten	Seven	Closed	-7,5	-16,7	18,3	70	26,1	0,21	-4,59
Eight	Nine	Open	0	0	0	120	0	0	0
Nine	Ten	Closed	74	-0,8	74	200	37	2,74	19,16

Cuando se desconecta la línea 8-9 del sistema no hay contingencia alguna, ya que ésta no genera sobrecargas ni desconexión de ningún otro elemento del sistema. Evidenciando así que la línea 8-9 no es una línea crítica para el sistema; las tensiones se pueden verificar en la tabla 62.

Tabla 60. Tensiones cuando se desconecta la línea 8-9.

Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
One	138	1,05	144,9	5,64			186,1	22,82
Two	138	1,04	143,52	-3,82	40	20	50,02	151,11
Three	138	0,9575	132,139	-5,55	110	40		
Four	138	1	138	-6,75	100	30	80,01	9,23
Five	138	1,0042	138,576	-8,81	150	40		
Six	138	1,005	138,691	-3,64	150	60		
Seven	138	1,04	143,52	-7,24	180	0	192,2	86,29
Eight	138	1,04	143,52	12,5			199	16,83
Nine	138	1	138	18,47			100,5	3,69
Ten	138	1	138	-2	150	0	100,2	1,62

Prueba en la línea 9-10

Tabla 61. Desconexión de la línea 9-10

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	128,3	-6,8	128,4	200	64,2	2,99	11,37
One	Three	Closed	78,8	3,4	78,9	120	65,8	4,54	8,4
Eight	One	Closed	106,6	-3,6	106,7	120	89,7	3,16	26,3
Two	Three	Closed	27	17,2	32	80	41	0,61	-2,3
Two	Four	Closed	25,5	12,8	28,6	100	29,5	0,49	-2,71
Two	Five	Closed	89,4	4,4	89,5	80	111,9	2,97	5,78
Two	Six	Closed	47	67,1	81,9	120	68,5	1,31	-1,23
Three	Four	Closed	-9,3	-25,6	27,2	100	27,2	0,07	-1,77
Four	Five	Closed	24,3	-11,3	26,8	60	44,6	0,53	-3,42
Seven	Five	Closed	40,5	47,3	62,3	80	79,1	0,76	-1,91
Six	Seven	Closed	22,5	-29,1	36,8	110	33,4	0,99	-2,19
Eight	Six	Closed	206,9	46,3	212	250	84,8	8,31	83,09
Six	Ten	Closed	71,8	0,7	71,8	120	60,4	0	10,49
Ten	Seven	Closed	-32,8	-7,1	33,6	70	48,6	0,88	-2,57
Eight	Nine	Closed	-73,9	47,5	87,9	120	73,2	2,14	10,71
Nine	Ten	Open	0	0	0	200	0	0	0

La desconexión de la línea de transmisión 9-10 genera una sobrecarga en otra línea del sistema, lo que hace que también se desconecte por operación de las protecciones, éste evento ocasiona un efecto en cascada, sobrecargando y sacando de operación diversas líneas del sistema, como se puede evidenciar en las siguientes tablas. Las variación de tensiones en el sistema se puede observar en el mapa de contorno de tensiones en la ilustración 31.

Ilustración 31. Contorno de tensiones con la desconexión de la línea 9-10.

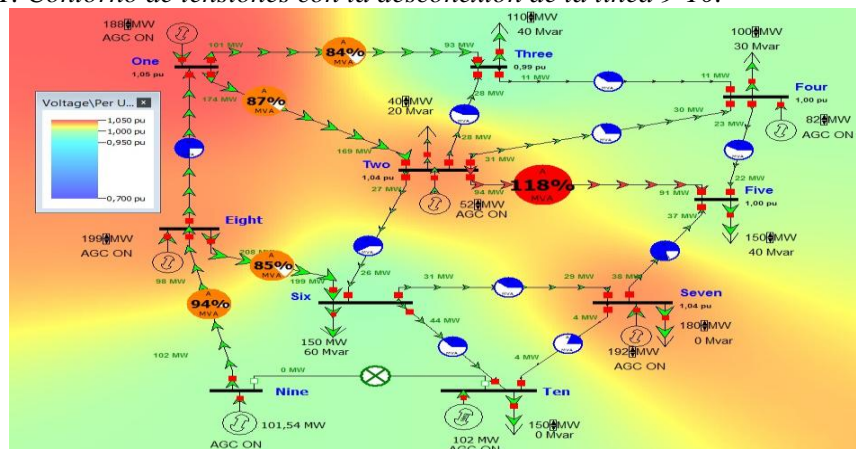


Tabla 62. Salida de operación de la línea 2-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	118,9	-6,5	119	200	59,5	2,56	8,84
One	Three	Closed	86,5	2,6	86,5	120	72,1	5,45	11,13
Eight	One	Closed	103,6	-4	103,7	120	87,2	2,98	24,85
Two	Three	Closed	42,3	13,2	44,4	80	55,4	1,13	-0,75
Two	Four	Closed	44,8	7,5	45,5	100	45,5	1,17	-0,66
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	93,8	61,9	112,4	120	93,7	2,4	2,07
Three	Four	Closed	12,2	-34,6	36,7	100	36,7	0,13	-1,59
Four	Five	Closed	65,4	-13	66,7	60	111,2	3,52	5,61
Seven	Five	Closed	90,3	61,3	109,1	80	136,4	2,25	2,65
Six	Seven	Closed	55,3	-37,9	67	110	61,4	3,56	5,53
Eight	Six	Closed	211,5	50,6	217,4	250	87	8,74	87,42
Six	Ten	Closed	88,8	0,9	88,8	120	75,1	0	16,25
Ten	Seven	Closed	-14,1	-14,3	20,1	70	28,7	0,27	-4,39
Eight	Nine	Closed	-75,3	48	89,3	120	74,5	2,21	11,07
Nine	Ten	Open	0	0	0	200	0	0	0

Tabla 63. Salida de operación de la línea 7-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	111,6	-6,2	111,7	200	55,9	2,26	7
One	Three	Closed	107,1	11,6	107,8	120	89,8	8,48	20,35
Eight	One	Closed	114,9	-2,5	115	120	96,7	3,66	30,54
Two	Three	Closed	75,2	20,6	78	80	97,4	3,42	6,25
Two	Four	Closed	86,7	16	88,1	100	88,1	4,35	9,01
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	14,9	72,1	73,6	120	62,8	1,08	-1,95
Three	Four	Closed	60,4	-34,3	69,5	100	69,5	0,51	-0,33
Four	Five	Closed	154,6	143,1	210,6	60	351,1	38,4	112,1
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-3,4	-20,3	20,6	110	18,7	0,27	-4,37
Eight	Six	Closed	198,1	41,8	202,4	250	81	7,58	75,78
Six	Ten	Closed	57,7	0,4	57,7	120	48,4	0	6,74
Ten	Seven	Closed	-47,2	-0,8	47,3	70	70,1	1,79	0,16
Eight	Nine	Closed	-73,4	47,4	87,4	120	72,8	2,12	10,6
Nine	Ten	Open	0	0	0	200	0	0	0

Como se evidencia en casos anteriores las sobrecargas en las líneas de transmisión siempre apuntan hacia la carga número 5, desconectándola como efecto del sistema para continuar su operación.

Tabla 64. Salida de operación de la línea 4-5.

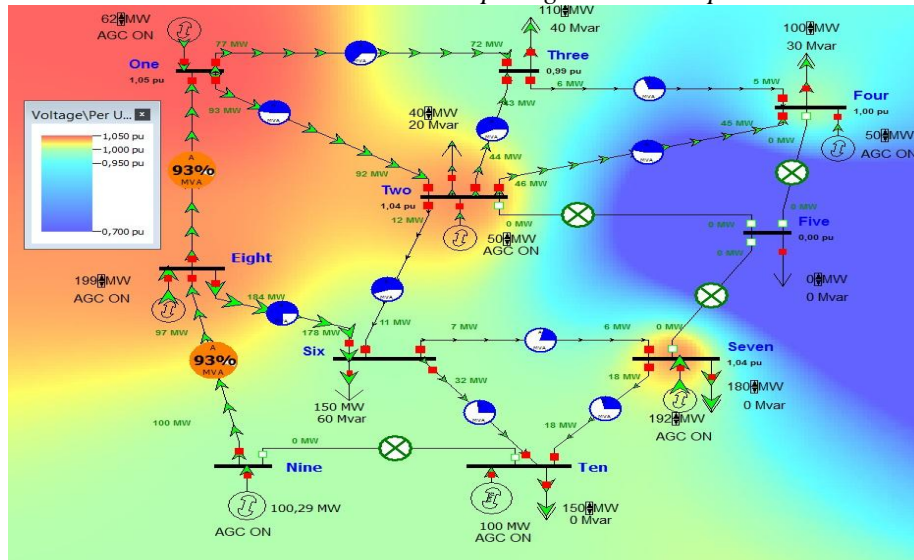
From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	92,9	-5,3	93	200	46,5	1,57	2,84
One	Three	Closed	74,4	4	74,6	120	62,1	4,06	6,95
Eight	One	Closed	119	-1,9	119	120	100,1	3,93	32,71
Two	Three	Closed	42	13	44	80	55	1,11	-0,81
Two	Four	Closed	42,6	8,1	43,3	100	43,3	1,06	-0,97
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	19	70,2	72,8	120	62	1,05	-2,02
Three	Four	Closed	1,3	-29,1	29,2	100	29,2	0,08	-1,74
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-3,4	-20,3	20,6	110	18,7	0,27	-4,38
Eight	Six	Closed	193,8	40,5	198	250	79,2	7,25	72,5
Six	Ten	Closed	57,9	0,5	57,9	120	48,5	0	6,78
Ten	Seven	Closed	-47,3	-0,7	47,3	70	70,2	1,79	0,17
Eight	Nine	Closed	-73,3	47,3	87,2	120	72,7	2,11	10,55
Nine	Ten	Open	0	0	0	200	0	0	0

Después de que sale de operación la línea 4-5 producto del efecto en cascada el sistema queda en estado de active Spliting, lo que aísla la carga número 5, siendo una de las más críticas para el sistema. El mapa de contorno de tensiones muestra las tensiones con las que sigue operando el sistema después del active Spliting.

Tabla 65. Cargas del sistema.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	0	0	0	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Ilustración 32. Contorno de tensiones en el active Splitting ocasionado por la línea 9-10.



4.2.2. Pruebas en las cargas

Prueba en la carga 2

Se procede a desconectar la carga número dos del sistema de potencia para hacer seguimiento a la contingencia generada.

Tabla 66. Desconexión de la carga 2.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Open	0	0	0	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	150	40	155,24	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Cuando se desconecta la carga 2 del sistema se pueden observar las variaciones en las tensiones con el mapa de contorno de tensiones presente en la siguiente ilustración.

Ilustración 33. Contorno de tensiones con la desconexión de la carga 2.

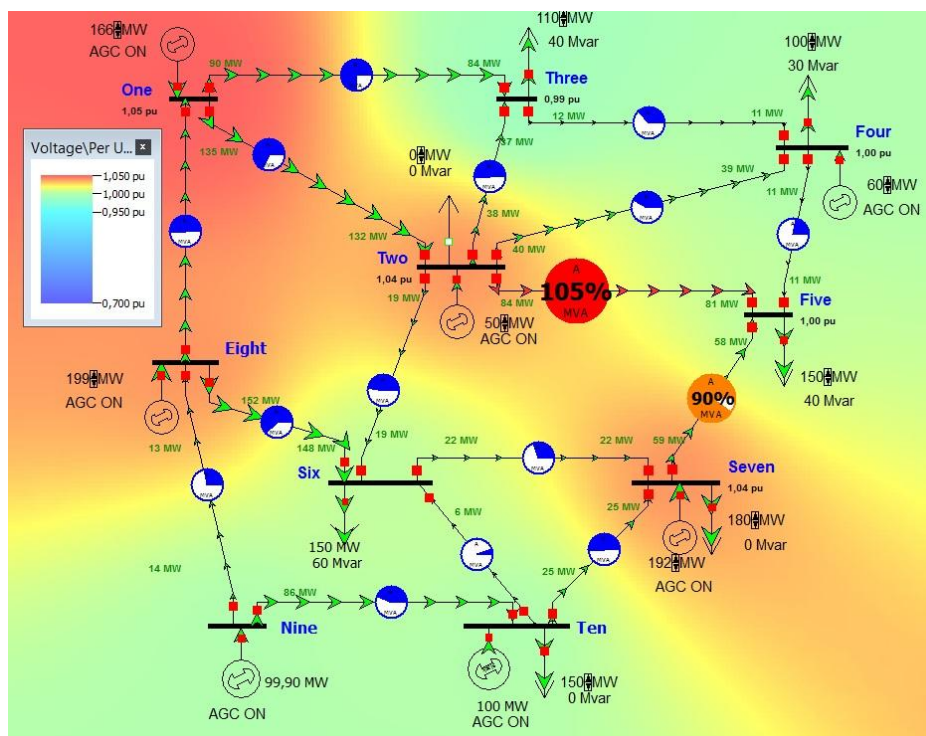


Tabla 67. Sobrecarga en la línea 2-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	110,9	-6,2	111	200	55,5	2,23	6,83
One	Three	Closed	79,1	3,4	79,2	120	66	4,57	8,49
Eight	One	Closed	66,5	-6,9	66,9	120	56,3	1,24	10,34
Two	Three	Closed	37,5	14,3	40,1	80	50,2	0,93	-1,34
Two	Four	Closed	38	9,3	39,1	100	39,1	0,87	-1,54
Two	Five	Closed	83,8	5,4	84	80	105	2,62	4,71
Two	Six	Closed	23,8	51,7	56,9	120	49,7	0,65	-3,27
Three	Four	Closed	1,1	-29,5	29,5	100	29,5	0,08	-1,73
Four	Five	Closed	12,6	-8,1	15	60	25	0,15	-4,56
Seven	Five	Closed	57,3	41,6	70,8	80	88,5	0,96	-1,3
Six	Seven	Closed	21,6	-23,8	32,1	110	29,2	0,73	-3,04
Eight	Six	Closed	147,1	24,4	149,1	250	59,6	4,11	41,11
Six	Ten	Closed	-5,5	2,1	5,9	120	4,9	0	0,07
Ten	Seven	Closed	25,3	-26,3	36,5	70	52,2	0,97	-2,3
Eight	Nine	Closed	-14,7	31	34,3	120	28,6	0,33	1,63
Nine	Ten	Closed	84,5	0,7	84,5	200	42,3	3,57	25

Como se puede observar en la tabla 69, la desconexión de la carga número genera inmediatamente una sobrecarga en la línea 2-5 del sistema, la cual por operación de las protecciones se retira.

Tabla 68. Salida de operación de la línea 2-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	100,5	-5,7	100,6	200	50,3	1,83	4,44
One	Three	Closed	85,5	2,8	85,6	120	71,3	5,33	10,77
Eight	One	Closed	61,4	-7,1	61,8	120	52	1,06	8,84
Two	Three	Closed	51,9	10,9	53	80	66,3	1,59	0,64
Two	Four	Closed	56	4,8	56,2	100	56,2	1,77	1,14
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	66,1	43,2	79	120	65,8	1,2	-1,61
Three	Four	Closed	20,5	-37,8	43	100	43	0,18	-1,44
Four	Five	Closed	50	-10,6	51,1	60	85,1	2,05	1,21
Seven	Five	Closed	104,7	55,7	118,6	80	148,3	2,65	3,83
Six	Seven	Closed	51,8	-31,6	60,7	110	55,1	2,82	3,24
Eight	Six	Closed	148,2	26,1	150,5	250	60,2	4,19	41,88
Six	Ten	Closed	7,2	0,7	7,2	120	6	0	0,1
Ten	Seven	Closed	45,8	-30,9	55,2	70	78,9	2,32	1,76
Eight	Nine	Closed	-10,6	30	31,9	120	26,5	0,28	1,41
Nine	Ten	Closed	90,6	1,7	90,6	200	45,3	4,1	28,73

La salida de operación de la línea 2-5 ocasiona una sobrecarga en la línea 7-5 del sistema, lo que conlleva a un efecto en cascada con las demás líneas del sistema, apuntando hacia la salida de circulación de la carga número 5.

Tabla 69. Salida de operación de la línea 7-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	96,3	-5,4	96,5	200	48,2	1,68	3,55
One	Three	Closed	110,7	15,7	111,8	120	93,2	9,14	22,39
Eight	One	Closed	80,1	-6,3	80,3	120	67,6	1,79	14,91
Two	Three	Closed	89,3	23,7	92,4	80	115,5	4,79	10,39
Two	Four	Closed	103,8	19,9	105,7	100	105,7	6,25	14,75
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-19,9	63,8	66,8	120	57,9	0,89	-2,56
Three	Four	Closed	76	-33,4	83	100	83	0,75	0,43
Four	Five	Closed	151,4	141,5	207,2	60	345,3	38,1	111,3

Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-13,3	-12,3	18,1	110	16,5	0,22	-4,59
Eight	Six	Closed	140,9	22,4	142,7	250	57,1	3,77	37,66
Six	Ten	Closed	-20,3	3,4	20,6	120	17,1	0	0,84
Ten	Seven	Closed	1,8	-19,7	19,8	70	28,2	0,24	-4,49
Eight	Nine	Closed	-22,2	32,8	39,6	120	33	0,43	2,17
Nine	Ten	Closed	76	-0,5	76	200	38	2,89	20,22

Tabla 70. Salida de operación de la línea 4-5.

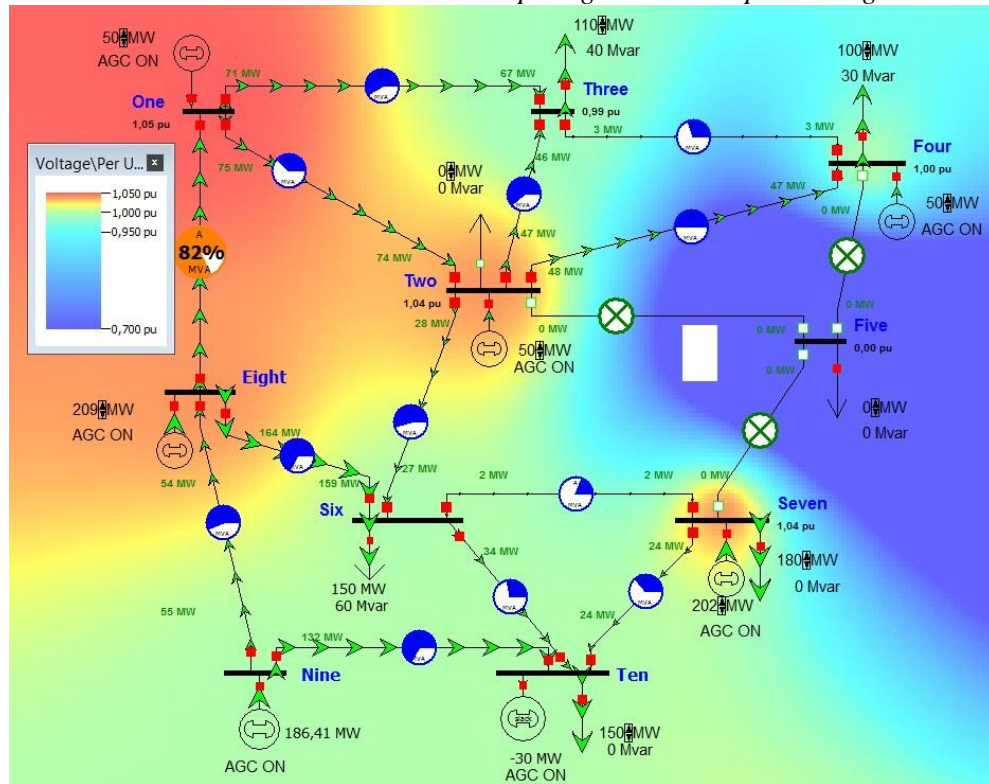
From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	75	-3,9	75,1	200	37,5	1,02	-0,44
One	Three	Closed	70,5	4,6	70,7	120	58,9	3,65	5,74
Eight	One	Closed	98,2	-4,6	98,3	120	82,7	2,68	22,33
Two	Three	Closed	47,5	11,5	48,9	80	61,1	1,36	-0,06
Two	Four	Closed	48,4	6,6	48,8	100	48,8	1,34	-0,14
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	28,1	58,8	65,1	120	56	0,84	-2,66
Three	Four	Closed	3	-29,5	29,7	100	29,7	0,08	-1,73
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	2,5	-20,3	20,4	110	18,6	0,26	-4,43
Eight	Six	Closed	164	30,4	166,8	250	66,7	5,14	51,44
Six	Ten	Closed	33,6	0,7	33,6	120	28	0	2,26
Ten	Seven	Closed	-23,5	-10,8	25,9	70	36,9	0,5	-3,71
Eight	Nine	Closed	-53,7	41,2	67,7	120	56,4	1,27	6,35
Nine	Ten	Closed	131,6	12,4	132,2	200	66,1	8,73	61,13

Cuando la línea 4-5 sale de operación el sistema queda en active Splitting, lo que deja la carga número 5 sin alimentación, como se puede ver en la tabla 73.

Tabla 71. Cargas del sistema.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Open	0	0	0	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	0	0	0	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Ilustración 34. Contorno de tensiones en el active Splitting ocasionado por la carga 2.



Prueba en la carga 3

Se procede a desconectar la carga número 3 para hacer seguimiento a la contingencia que ésta genera.

Tabla 72. Desconexión de la carga 3.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Open	0	0	0	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	150	40	155,24	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Tabla 73. Generación del sistema.

Name of Bus	Status	Gen MW	Gen Mvar	Set Volt	Min MW	Max MW	Min Mvar	Max Mvar
One	Closed	100,01	10,76	1,05	50	250	-200	200
Two	Closed	50	121,27	1,04	50	300	-200	200

Four	Closed	50	-16,05	1	50	200	-200	200
Seven	Closed	192,1	85,76	1,04	0	300	-200	200
Eight	Closed	198,89	48,5	1,04	150	300	-200	200
Nine	Closed	99,59	-28,84	1	0	200	-200	200
Ten	Closed	99,67	-3,88	1	0	1000	-9900	9900

La desconexión en la carga número 3 no genera contingencia alguna debido a que la generación en los nodos 2 y 4 se puede regular fácilmente con un re despacho de generación, como se puede observar en la tabla 75.

Prueba en la carga 4

Se procede a desconectar la carga número 4 del sistema para hacer seguimiento a la reacción del sistema.

Tabla 74. Desconexión de la carga 4.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Open	0	0	0	100	30
Five	Closed	150	40	155,24	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Tabla 75. Generación del sistema

Name of Bus	Status	Gen MW	Gen Mvar	Set Volt	Min MW	Max MW	Min Mvar	Max Mvar
One	Closed	103,4	17,5	1,05	50	250	-200	200
Two	Closed	53,39	130,34	1,04	50	300	-200	200
Four	Closed	53,39	-20,39	1	50	200	-200	200
Seven	Closed	192,1	85,65	1,04	0	300	-200	200
Eight	Closed	198,89	48,49	1,04	150	300	-200	200
Nine	Closed	99,59	-28,94	1	0	200	-200	200
Ten	Closed	99,95	-3,95	1	0	1000	- 9900	9900

Como se puede observar en las dos anteriores tablas la desconexión de la carga número 4 del sistema no genera contingencia alguna, debido a que se puede hacer un re despacho de generación en los generadores 1, 2 y 4, bajando su producción de potencia inmediatamente.

Prueba en la carga 5

Se procede a desconectar la carga número 5 del sistema para hacer seguimiento a la reacción del sistema.

Tabla 76. Desconexión de la carga 5.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Open	0	0	0	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Cuando la carga número 5 se desconecta se puede hacer un re despacho de generación del sistema, los generadores 2 y 4 bajan la potencia generada hasta 50 MW, regulando el sistema y haciendo que siga operando de manera normal, los valores de la nueva generación se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 77. Generación del sistema.

Name of Bus	Status	Gen MW	Gen Mvar	Set Volt	Min MW	Max MW	Min Mvar	Max Mvar
One	Closed	58,49	23,41	1,05	50	250	-200	200
Two	Closed	50	103,07	1,04	50	300	-200	200
Four	Closed	50	31,86	1	50	200	-200	200
Seven	Closed	191,99	27,73	1,04	0	300	-200	200
Eight	Closed	198,78	48,46	1,04	150	300	-200	200
Nine	Closed	98,55	-30,79	1	0	200	-200	200
Ten	Closed	98,76	-3,11	1	0	1000	-9900	9900

Prueba en la carga 6

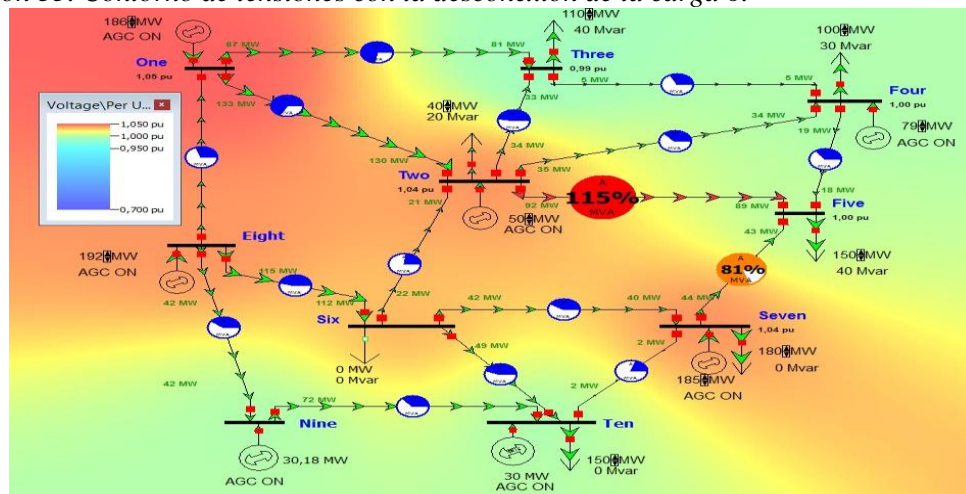
Se procede a desconectar la carga número 6 del sistema para hacer seguimiento a la contingencia generada, los datos se pueden observar en las siguientes tablas.

Tabla 78. Cargas del sistema.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20

Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	150	40	155,24	150	40
Six	Open	0	0	0	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Ilustración 35. Contorno de tensiones con la desconexión de la carga 6.



Con la desconexión de la carga número 6 se produce una sobrecarga en la línea 2-5 del sistema, como se puede observar en la tabla 81.

Tabla 79. Sobrecarga de la línea 2-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	88,7	-5	88,8	200	44,4	1,43	2,01
One	Three	Closed	67	5,1	67,2	120	56	3,3	4,68
Eight	One	Closed	46,8	-7,2	47,4	120	39,9	0,62	5,19
Two	Three	Closed	34,8	14,7	37,8	80	47,2	0,83	-1,64
Two	Four	Closed	32,9	10,7	34,6	100	34,6	0,69	-2,09
Two	Five	Closed	93,1	3,6	93,1	80	116,4	3,21	6,51
Two	Six	Closed	-12,6	14,2	19	120	19,2	0,08	-5,12
Three	Four	Closed	-12,3	-23,3	26,3	100	26,3	0,07	-1,79
Four	Five	Closed	20,7	-10,3	23,1	60	38,5	0,39	-3,85
Seven	Five	Closed	40,6	47,4	62,4	80	79,3	0,76	-1,9
Six	Seven	Closed	40,6	-17	44	110	40	1,39	-1,21
Eight	Six	Closed	105,5	3,6	105,6	250	42,2	2,06	20,62
Six	Ten	Closed	50,3	19,3	53,9	120	44,9	0	5,44
Ten	Seven	Closed	-3,5	-18	18,3	70	26,2	0,2	-4,6

Eight	Nine	Closed	39,5	20,7	44,7	120	37,2	0,55	2,76
Nine	Ten	Closed	68,7	-1,4	68,7	200	34,4	2,36	16,53

Debido a que la línea 2-5 sale de operación por la sobrecarga ocasionada, se producen nuevas sobrecargas en diferentes líneas del sistema, apuntando hacia la carga crítica número 5.

Tabla 80. Salida de operación de la línea 2-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	77,2	-4,1	77,3	200	38,6	1,08	-0,07
One	Three	Closed	73,9	4,2	74,1	120	61,7	4	6,79
Eight	One	Closed	41,2	-7,1	41,8	120	35,2	0,49	4,04
Two	Three	Closed	50,6	10,9	51,8	80	64,7	1,52	0,42
Two	Four	Closed	52,6	5,6	52,9	100	52,9	1,57	0,55
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	34,8	5,1	35,1	120	29,9	0,23	-4,65
Three	Four	Closed	9	-32,2	33,4	100	33,4	0,11	-1,66
Four	Five	Closed	61,9	-12,5	63,2	60	105,3	3,15	4,5
Seven	Five	Closed	93,6	59,9	111,1	80	138,9	2,33	2,88
Six	Seven	Closed	74,8	-24,7	78,8	110	71,6	4,6	8,44
Eight	Six	Closed	106,6	5,7	106,8	250	42,7	2,11	21,09
Six	Ten	Closed	64,2	19	67	120	55,8	0	8,47
Ten	Seven	Closed	18,7	-24,6	30,9	70	44,2	0,67	-3,19
Eight	Nine	Closed	44,2	20,1	48,6	120	40,5	0,65	3,27
Nine	Ten	Closed	75,2	-0,6	75,2	200	37,6	2,83	19,8

Tabla 81. Salida de operación de la línea 7-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	73,2	-3,8	73,3	200	36,7	0,97	-0,72
One	Three	Closed	96,8	13,1	97,7	120	81,4	6,98	15,87
Eight	One	Closed	57,7	-7,2	58,1	120	48,9	0,94	7,81
Two	Three	Closed	84	19,6	86,2	80	107,8	4,18	8,51
Two	Four	Closed	95,4	15,6	96,6	100	96,6	5,22	11,63
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-42,3	21,8	47,6	120	41,6	0,44	-4,05
Three	Four	Closed	59,6	-31,7	67,5	100	67,5	0,48	-0,41
Four	Five	Closed	154	142,8	210,1	60	350,1	38,35	111,97
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	15,4	-9,8	18,2	110	16,6	0,21	-4,74

Eight	Six	Closed	100,2	2,2	100,2	250	40,1	1,86	18,56
Six	Ten	Closed	40,2	19,4	44,6	120	37,2	0	3,72
Ten	Seven	Closed	-19,8	-12,3	23,3	70	33,3	0,39	-4,03
Eight	Nine	Closed	34	21,6	40,3	120	33,6	0,45	2,25
Nine	Ten	Closed	62,6	-1,9	62,6	200	31,3	1,96	13,72

Tabla 82. Salida de operación de la línea 4-5.

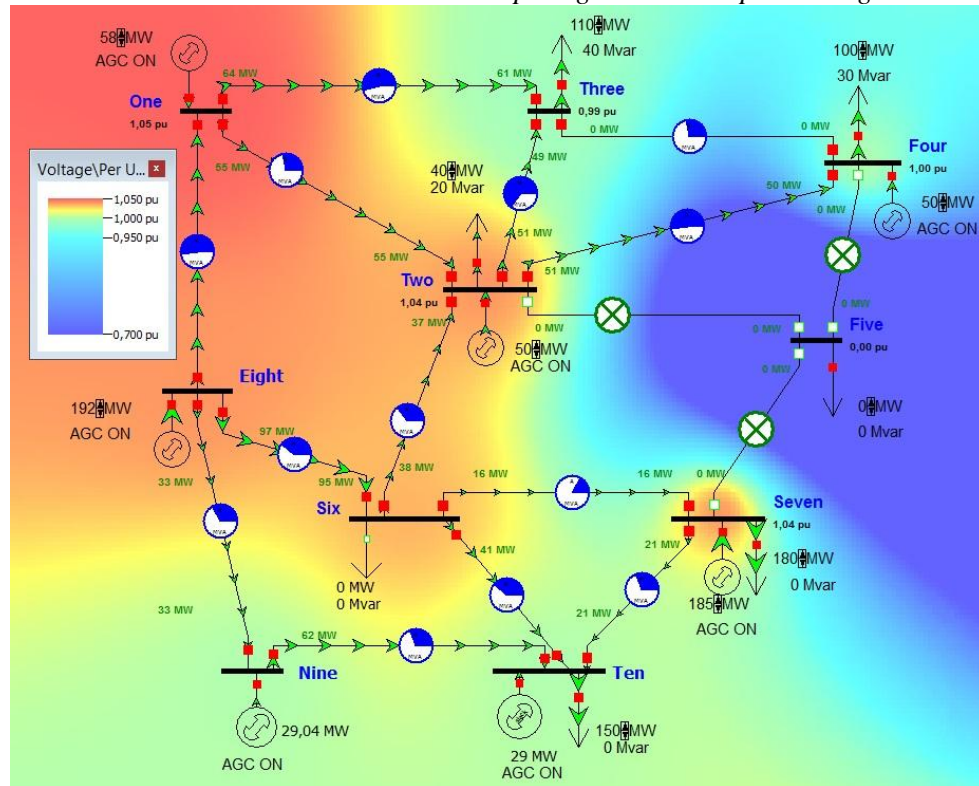
From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	55,2	-2,1	55,2	200	27,6	0,55	-3,24
One	Three	Closed	64,1	5,7	64,4	120	53,6	3,03	3,89
Eight	One	Closed	62,1	-7,1	62,5	120	52,6	1,08	9,04
Two	Three	Closed	50,8	10,6	51,9	80	64,9	1,52	0,43
Two	Four	Closed	51,2	5,9	51,6	100	51,6	1,49	0,31
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-37,4	20,2	42,5	120	37,5	0,36	-4,31
Three	Four	Closed	0,3	-28	28	100	28	0,07	-1,76
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	15,8	-10	18,7	110	17	0,23	-4,7
Eight	Six	Closed	96,5	2	96,5	250	38,6	1,72	17,23
Six	Ten	Closed	41,3	19,4	45,6	120	38	0	3,89
Ten	Seven	Closed	-20,2	-12,1	23,5	70	33,6	0,4	-4
Eight	Nine	Closed	33,2	21,7	39,6	120	33	0,44	2,18
Nine	Ten	Closed	61,6	-2	61,6	200	30,8	1,9	13,3

Cuando la línea 4-5 finalmente sale de operación consecuencia del efecto en cascada, el sistema se aliviana y vuelve a su funcionamiento normal, dejando sin alimentación el nodo número 5, siendo éste el más crítico para el sistema; se puede observar la carga sin alimentación en la tabla 82.

Tabla 83. Cargas del sistema.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	0	0	0	150	40
Six	Open	0	0	0	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Ilustración 36. Contorno de tensiones en el active Splitting ocasionado por la carga 6.



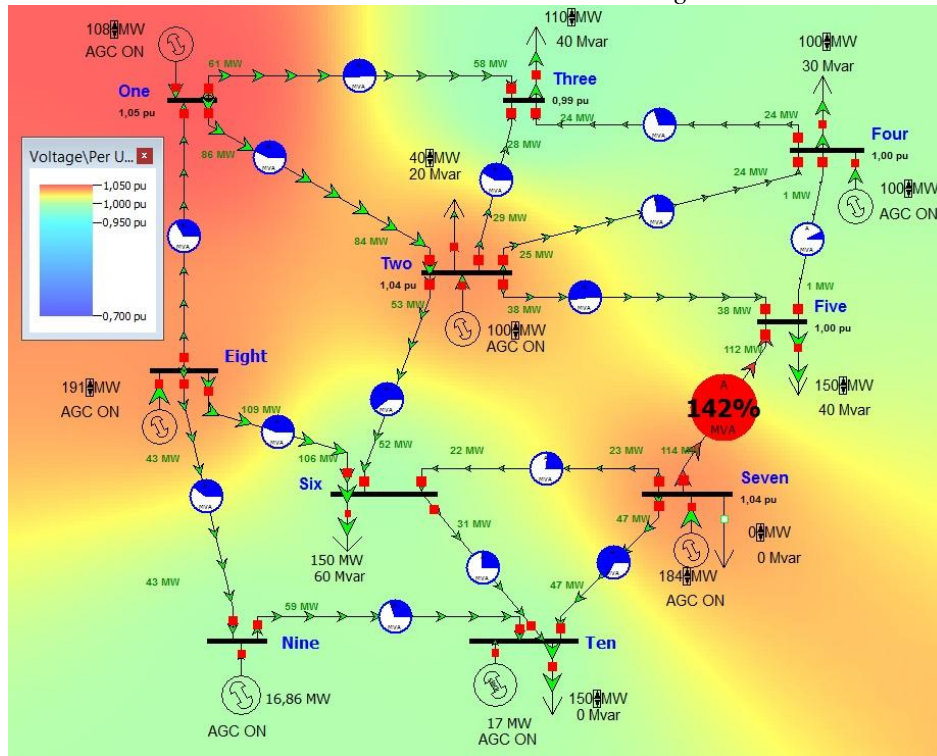
Prueba en la carga 7

Se procede a desconectar la carga número 7 del sistema para hacer seguimiento a la contingencia generada con su ausencia.

Tabla 84. Desconexión de la carga 7.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	150	40	155,24	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Open	0	0	0	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Ilustración 37. Contorno de tensiones con la desconexión de la carga 7.



Con la desconexión de la carga 7 del sistema se genera una sobrecarga en la línea de transmisión 7-5 de éste mismo, y al salir ésta de operación sobrecarga diferentes líneas del sistema, ocasionando un efecto en cascada como se puede observar en las siguientes tablas.

Tabla 85. Sobrecarga en la línea 7-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	85,8	-4,8	86	200	43	1,34	1,47
One	Three	Closed	61	6,1	61,3	120	51,1	2,75	3,04
Eight	One	Closed	38,8	-7	39,4	120	33,2	0,43	3,59
Two	Three	Closed	28,7	16,3	33	80	42	0,65	-2,2
Two	Four	Closed	24,7	13,1	27,9	100	28,9	0,47	-2,77
Two	Five	Closed	38,3	17,1	42	80	52,5	0,67	-1,12
Two	Six	Closed	53,1	49,2	72,3	120	60,9	1,02	-2,15
Three	Four	Closed	-23,7	-18,5	30,1	100	30,1	0,09	-1,72
Four	Five	Closed	0,6	-4,5	4,5	60	7,6	0	-5,01
Seven	Five	Closed	114,3	24,7	117	80	146,2	2,55	3,47
Six	Seven	Closed	-22,1	-11,3	24,9	110	22,6	0,45	-3,84
Eight	Six	Closed	108,6	20,9	110,6	250	44,2	2,26	22,61

Six	Ten	Closed	30,5	1	30,5	120	25,4	0	1,86
Ten	Seven	Closed	-45,3	-1,7	45,3	70	67	1,64	-0,28
Eight	Nine	Closed	43,3	20,2	47,7	120	39,8	0,63	3,16
Nine	Ten	Closed	59,4	-2,2	59,5	200	29,7	1,77	12,37

Tabla 86. Salida de operación de la línea 7-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	95,9	-5,4	96,1	200	48	1,67	3,47
One	Three	Closed	72,4	4,3	72,5	120	60,4	3,83	6,29
Eight	One	Closed	58,5	-7,1	58,9	120	49,5	0,96	8,02
Two	Three	Closed	37,5	14,1	40,1	80	50,1	0,93	-1,35
Two	Four	Closed	36,9	9,6	38,1	100	38,1	0,83	-1,67
Two	Five	Closed	123,8	45,2	131,8	80	164,8	6,48	16,48
Two	Six	Closed	-41,5	81,2	91,2	120	76,9	1,62	-0,34
Three	Four	Closed	-4,9	-26,6	27	100	27	0,07	-1,78
Four	Five	Closed	33,7	9,6	35	60	58,4	1,02	-1,67
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-86,6	20,2	88,9	110	84,7	6,41	14,02
Eight	Six	Closed	106,5	20,6	108,5	250	43,4	2,18	21,75
Six	Ten	Closed	-2,2	0,2	2,2	120	1,8	0	0,01
Ten	Seven	Closed	-85,1	19,1	87,2	70	130,6	6,17	13,3
Eight	Nine	Closed	26,1	22,8	34,7	120	28,9	0,33	1,67
Nine	Ten	Closed	47	-2,8	47,1	200	23,6	1,11	7,77

Tabla 87. salida de operación de la línea 2-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	77,2	-4,1	77,3	200	38,7	1,08	-0,06
One	Three	Closed	98	13	98,9	120	82,4	7,15	16,38
Eight	One	Closed	63,2	-7	63,6	120	53,5	1,12	9,34
Two	Three	Closed	83,3	19,8	85,6	80	107	4,11	8,32
Two	Four	Closed	94,7	15,7	96	100	96	5,16	11,44
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-36,9	79,6	87,8	120	74,2	1,51	-0,69
Three	Four	Closed	60	-31,9	68	100	68	0,49	-0,39
Four	Five	Closed	154	142,8	210,1	60	350,1	38,35	111,97
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-86,3	20	88,6	110	84,4	6,36	13,88
Eight	Six	Closed	102,8	20,2	104,8	250	41,9	2,03	20,31
Six	Ten	Closed	-1,3	0,2	1,4	120	1,1	0	0

Ten	Seven	Closed	-85,4	19,3	87,5	70	131,1	6,21	13,43
Eight	Nine	Closed	25,1	23	34	120	28,4	0,32	1,61
Nine	Ten	Closed	45,9	-2,8	46	200	23	1,06	7,41

Tabla 88. Salida de operación de la línea 4-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	59,1	-2,5	59,2	200	29,6	0,63	-2,75
One	Three	Closed	65,4	5,5	65,6	120	54,7	3,15	4,24
Eight	One	Closed	67,6	-6,9	68	120	57,2	1,28	10,68
Two	Three	Closed	50,1	10,8	51,3	80	64,1	1,49	0,33
Two	Four	Closed	50,7	6,1	51	100	51	1,46	0,22
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-32,3	77,9	84,4	120	71,5	1,4	-1,02
Three	Four	Closed	0,9	-28,3	28,3	100	28,3	0,08	-1,76
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-86	19,8	88,2	110	84,1	6,31	13,71
Eight	Six	Closed	99,2	19,9	101,2	250	40,5	1,89	18,94
Six	Ten	Closed	-0,4	0,1	0,4	120	0,3	0	0
Ten	Seven	Closed	-85,7	19,5	87,9	70	131,7	6,26	13,59
Eight	Nine	Closed	24,2	23,2	33,5	120	27,9	0,31	1,56
Nine	Ten	Closed	44,9	-2,8	45	200	22,5	1,01	7,07

Tabla 89. Salida de operación de la línea 10-7.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	56,6	-2,2	56,7	200	28,3	0,58	-3,06
One	Three	Closed	64,6	5,6	64,8	120	54	3,08	4,01
Eight	One	Closed	64,2	-7	64,5	120	54,3	1,16	9,63
Two	Three	Closed	50,5	10,7	51,7	80	64,6	1,51	0,4
Two	Four	Closed	51	6	51,4	100	51,4	1,48	0,28
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-35,5	112,5	118	120	98,3	2,69	2,95
Three	Four	Closed	0,5	-28,1	28,1	100	28,1	0,07	-1,76
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-159,6	68,3	173,6	110	168,1	25,31	70,82
Eight	Six	Closed	88,2	28,9	92,8	250	37,1	1,59	15,93
Six	Ten	Closed	58	-5,7	58,3	120	49,5	0	7,05

Ten	Seven	Open	0	0	0	70	0	0	0
Eight	Nine	Closed	39,3	20,7	44,5	120	37,1	0,55	2,74
Nine	Ten	Closed	66,5	-1,6	66,5	200	33,2	2,21	15,47

Tabla 90. salida de operación de la línea 6-7.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	74,7	-3,9	74,8	200	37,4	1,01	-0,48
One	Three	Closed	70,3	4,7	70,5	120	58,7	3,63	5,66
Eight	One	Closed	88,4	-5,6	88,6	120	74,5	2,18	18,15
Two	Three	Closed	47,4	11,6	48,7	80	60,9	1,35	-0,08
Two	Four	Closed	48,2	6,7	48,7	100	48,7	1,33	-0,17
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-11,4	70,7	71,6	120	61,5	1,02	-2,15
Three	Four	Closed	2,7	-29,4	29,5	100	29,5	0,08	-1,74
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Open	0	0	0	110	0	0	0
Eight	Six	Closed	139,7	25,2	142	250	56,8	3,73	37,29
Six	Ten	Closed	-26,4	0,7	26,4	120	22	0	1,39
Ten	Seven	Open	0	0	0	70	0	0	0
Eight	Nine	Closed	-28,8	34,4	44,9	120	37,4	0,56	2,79
Nine	Ten	Closed	75	-0,7	75	200	37,5	2,81	19,67

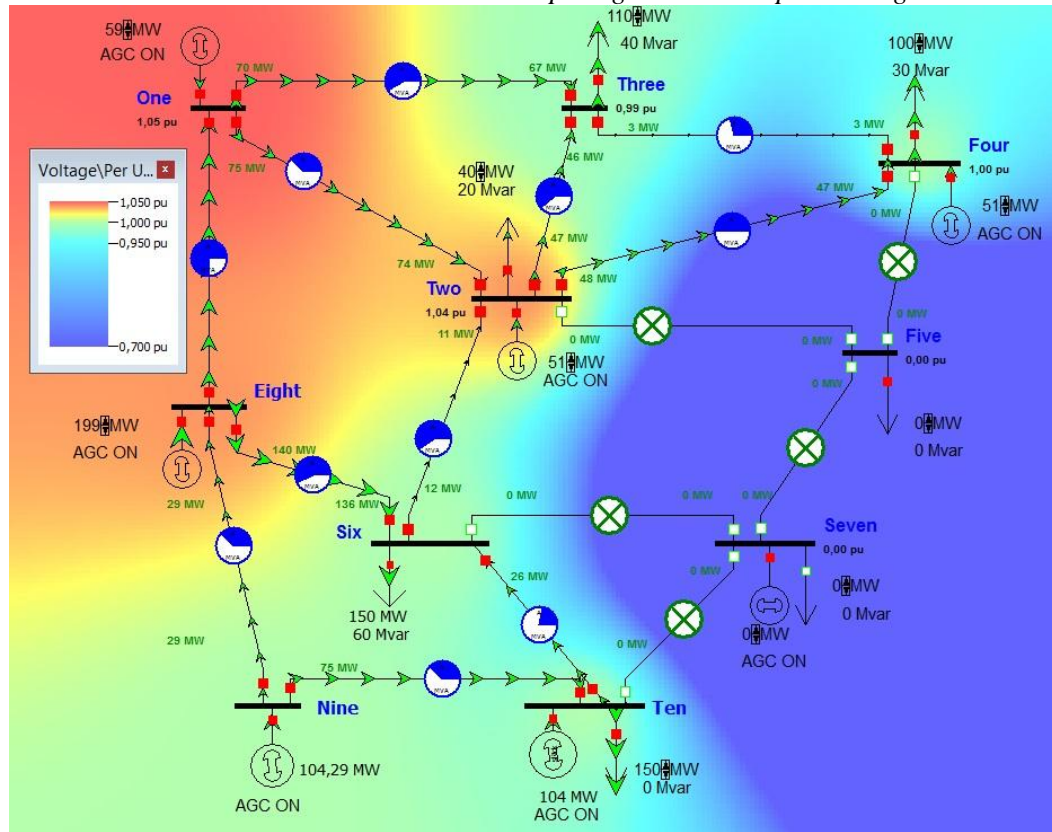
Como consecuencia del efecto en cascada se produce un active Splitting, haciendo que el sistema funcione de manera dividida, como se puede observar en la tabla 90.

Tabla 91. Cargas del sistema.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	0	0	0	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Open	0	0	0	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Las tensiones con que el sistema sigue operando después del active Splitting son las que se observan en el mapa de contorno de tensiones que está en la siguiente ilustración.

Ilustración 38. Contorno de tensiones en el active Splitting ocasionado por la carga 7.



Prueba en la carga 10

Se procede a desconectar la carga número 10 del sistema para observar el efecto que produce la ausencia de ésta.

Tabla 92. Desconexión de la carga 10.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	150	40	155,24	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Open	0	0	0	150	0

La desconexión de la carga número 10 del sistema no genera contingencia alguna, debido a que no es una carga crítica para el sistema, éste continua con su operación normal y la generación se regula de manera automática.

Tabla 93. Generación del sistema.

Name of Bus	Status	Gen MW	Gen Mvar	Set Volt	Min MW	Max MW	Min Mvar	Max Mvar
One	Closed	109,08	13,99	1,05	50	250	-200	200
Two	Closed	100,89	111,82	1,04	50	300	-200	200
Four	Closed	100,89	27,81	1	50	200	-200	200
Seven	Closed	177,88	91,65	1,04	0	300	-200	200
Eight	Closed	192,33	37,47	1,04	150	300	-200	200
Nine	Closed	34,05	-27,12	1	0	200	-200	200
Ten	Closed	33,35	-23,14	1	0	1000	-9900	9900

4.2.3. Pruebas en los generadores

Para continuar con el análisis de las contingencias n-1 se procede a desconectar uno por uno, todos los generadores del sistema, y observar los cambios y consecuencias que su ausencia presenta para el sistema.

Prueba en el generador 1

Se procede a desconectar el generador 1 para observar la reacción del sistema eléctrico de potencia.

Tabla 94. Desconexión del generador 1.

Name of Bus	Status	Gen MW	Gen Mvar	Set Volt	Min MW	Max MW	Min Mvar	Max Mvar
One	Open	0	0	1,05	50	250	-200	200
Two	Closed	154,3	120,8	1,04	50	300	-200	200
Four	Closed	154,3	14,25	1	50	200	-200	200
Seven	Closed	184,79	88,4	1,04	0	300	-200	200
Eight	Closed	199,24	57,19	1,04	150	300	-200	200
Nine	Closed	103,13	-30,33	1	0	200	-200	200
Ten	Closed	102,32	-5,31	1	0	1000	-9900	9900

Ilustración 39. Contorno de tensiones con la desconexión del generador 1.

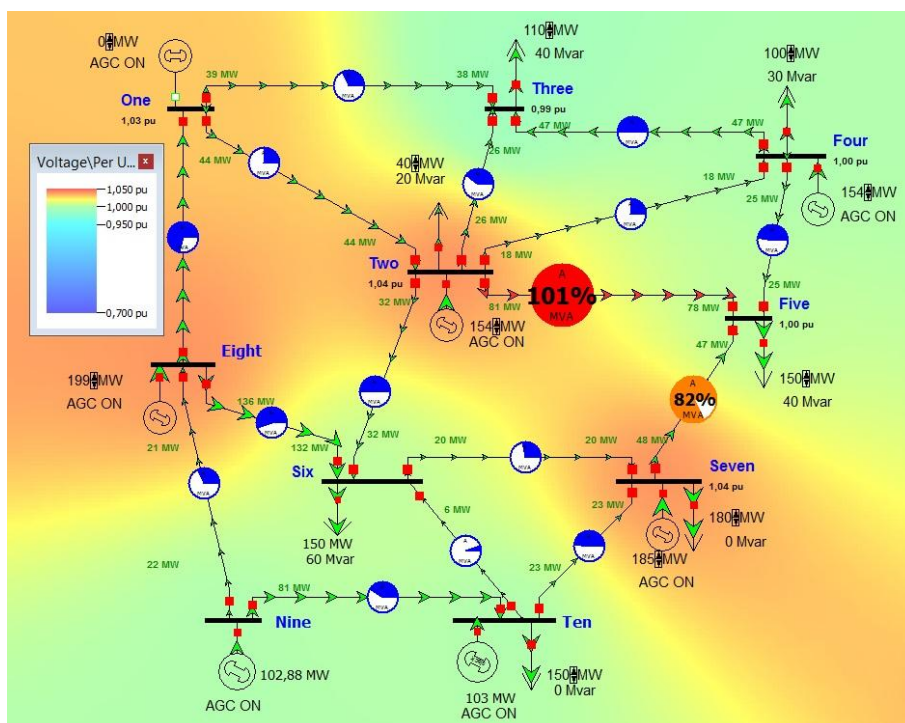


Tabla 95. Sobrecarga en la línea 2-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	44	-17,5	47,4	200	23,7	0,4	-4,01
One	Three	Closed	38,7	3,1	38,8	120	32,3	1,15	-1,65
Eight	One	Closed	84,7	2,2	84,7	120	70,6	1,99	16,6
Two	Three	Closed	26,4	17,7	31,8	80	40,9	0,61	-2,31
Two	Four	Closed	18,3	15	23,7	100	25,5	0,35	-3,12
Two	Five	Closed	80,7	6,2	80,9	80	101,2	2,43	4,16
Two	Six	Closed	32,5	48,4	58,3	120	50,5	0,68	-3,19
Three	Four	Closed	-46,7	-15,2	49,1	100	49,1	0,24	-1,25
Four	Five	Closed	25,4	-11,7	27,9	60	46,5	0,58	-3,27
Seven	Five	Closed	47,8	44,6	65,4	80	82,4	0,83	-1,7
Six	Seven	Closed	20,3	-23,4	30,9	110	28,1	0,67	-3,22
Eight	Six	Closed	136,1	22,4	137,9	250	55,2	3,52	35,17
Six	Ten	Closed	-5,9	2,2	6,3	120	5,2	0	0,08
Ten	Seven	Closed	24,3	-26,1	35,6	70	50,9	0,92	-2,45
Eight	Nine	Closed	-21,5	32,6	39,1	120	32,6	0,42	2,12
Nine	Ten	Closed	81,2	0,2	81,2	200	40,6	3,29	23,05

Al desconectar el generador 1 se produce inmediatamente una sobrecarga en la línea 2-5 del sistema, como se puede observar en la tabla 95.

Tabla 96. Salida de operación de la línea 2-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	33,9	-15,5	37,2	200	18,6	0,24	-4,97
One	Three	Closed	44,4	2,2	44,5	120	37,1	1,5	-0,61
Eight	One	Closed	80,1	1,5	80,1	120	66,7	1,78	14,82
Two	Three	Closed	40	14	42,4	80	53	1,03	-1,03
Two	Four	Closed	35,3	10	36,7	100	36,7	0,77	-1,84
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	73,7	40,4	84,1	120	70,1	1,35	-1,16
Three	Four	Closed	-28,1	-22,2	35,8	100	35,8	0,13	-1,6
Four	Five	Closed	61,8	-12,5	63	60	105,1	3,13	4,47
Seven	Five	Closed	93,7	59,9	111,2	80	139	2,33	2,89
Six	Seven	Closed	49,5	-31	58,4	110	53,1	2,6	2,59
Eight	Six	Closed	137,1	24	139,2	250	55,7	3,58	35,83
Six	Ten	Closed	6,4	0,8	6,5	120	5,4	0	0,08
Ten	Seven	Closed	44	-30,5	53,6	70	76,5	2,18	1,33
Eight	Nine	Closed	-17,7	31,7	36,3	120	30,3	0,37	1,83
Nine	Ten	Closed	87,1	1,1	87,1	200	43,6	3,79	26,56

Debido a la sobrecarga en la línea 2-5 producida por la ausencia del generador 1 debe salir de operación la línea, ocasionando una nueva sobrecarga, en otra línea del sistema.

Tabla 97. Salida de operación de la línea 7-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	28,1	-19,3	34,1	200	17	0,2	-5,21
One	Three	Closed	65,9	2,8	66	120	55	3,33	4,98
Eight	One	Closed	96,6	5,2	96,7	120	80,6	2,6	21,63
Two	Three	Closed	73,4	15,9	75,1	80	93,9	3,17	5,45
Two	Four	Closed	78,1	11	78,9	100	78,9	3,48	6,35
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-3,2	57,7	57,8	120	50,9	0,68	-3,2
Three	Four	Closed	22,8	-31,7	39	100	39	0,15	-1,45
Four	Five	Closed	157,7	144,4	213,8	60	356,3	38,62	112,67
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-8,8	-13,9	16,4	110	14,9	0,16	-4,74
Eight	Six	Closed	130,5	20,7	132,1	250	52,8	3,23	32,27
Six	Ten	Closed	-17,9	3,3	18,2	120	15,2	0	0,66
Ten	Seven	Closed	4,5	-20,5	21	70	30	0,28	-4,38
Eight	Nine	Closed	-27,9	34,2	44,1	120	36,8	0,54	2,7

Nine	Ten	Closed	74	-0,8	74	200	37	2,74	19,18
-------------	-----	--------	----	------	----	-----	----	------	-------

Tabla 98. Salida de operación de la línea 4-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	40,8	-17,5	44,4	200	22,2	0,35	-4,31
One	Three	Closed	50,5	0,4	50,5	120	42,1	1,93	0,68
Eight	One	Closed	93,7	3,2	93,8	120	78,1	2,44	20,32
Two	Three	Closed	44,1	13,2	46	80	57,5	1,21	-0,5
Two	Four	Closed	41,2	8,5	42	100	42	1	-1,16
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-6,3	58,8	59,1	120	51,9	0,71	-3,12
Three	Four	Closed	-18,6	-26,6	32,5	100	32,5	0,1	-1,67
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-9	-13,8	16,5	110	15	0,16	-4,74
Eight	Six	Closed	132,8	21,1	134,5	250	53,8	3,34	33,44
Six	Ten	Closed	-18,5	3,3	18,8	120	15,7	0	0,7
Ten	Seven	Closed	4,7	-20,6	21,1	70	30,2	0,28	-4,36
Eight	Nine	Closed	-27,3	34	43,7	120	36,4	0,53	2,64
Nine	Ten	Closed	74,8	-0,7	74,8	200	37,4	2,79	19,56

Cuando la línea 4-5 sale de operación el sistema queda en estado de active Spliting, dejando divisiones y sin alimentación la carga número 5.

Tabla 99. Cargas del sistema.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	0	0	0	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Las tensiones con las que continua operando el sistema después del active Spliting son las que se observan en la siguiente ilustración.

The diagram illustrates a power system with 10 buses, each with specific MW and Mvar loads and voltage levels. The background color represents the voltage magnitude, with a legend indicating the following scale:

- 1,050 pu (Red)
- 1,000 pu (Orange)
- 0,950 pu (Yellow)
- 0,900 pu (Green)
- 0,850 pu (Blue)
- 0,800 pu (Purple)
- 0,750 pu (Dark Blue)

The buses and their associated data are as follows:

- One:** 0 MW, AGC ON, 1,03 pu
- Two:** 40 MW, 20 Mvar, 1,04 pu
- Three:** 110 MW, 40 Mvar, 0,99 pu
- Four:** 100 MW, 30 Mvar, 1,00 pu
- Five:** 0 MW, 0 Mvar, 0,00 pu
- Six:** 150 MW, 60 Mvar, 0,95 pu
- Seven:** 180 MW, 0 Mvar, 1,04 pu
- Eight:** 190 MW, AGC ON, 0,95 pu
- Nine:** 102,20 MW, AGC ON, 0,85 pu
- Ten:** 150 MW, 0 Mvar, AGC ON, 0,85 pu

Transmission lines connect the buses, with power flows indicated by arrows and values. For example, a line from One to Two carries 50 MW, and a line from Two to Three carries 40 MW. The diagram also shows various control elements like AGC ON and Mvar sources.

Name	Status	Gen	Gen	Se
------	--------	-----	-----	----

of Bus		MW	Mvar	Volt	MW	MW	Mvar	Mvar
One	Closed	161,05	53,65	1,05	50	250	-200	200
Two	Open	0	0	1,04	50	300	-200	200
Four	Closed	152,89	62,58	1	50	200	-200	200
Seven	Closed	184,92	123,6	1,04	0	300	-200	200
Eight	Closed	199,37	63,27	1,04	150	300	-200	200
Nine	Closed	104,45	-28,04	1	0	200	-200	200
Ten	Closed	102,74	9,54	1	0	1000	-9900	9900

Ilustración 41. Contorno de tensiones con la desconexión del generador 2.

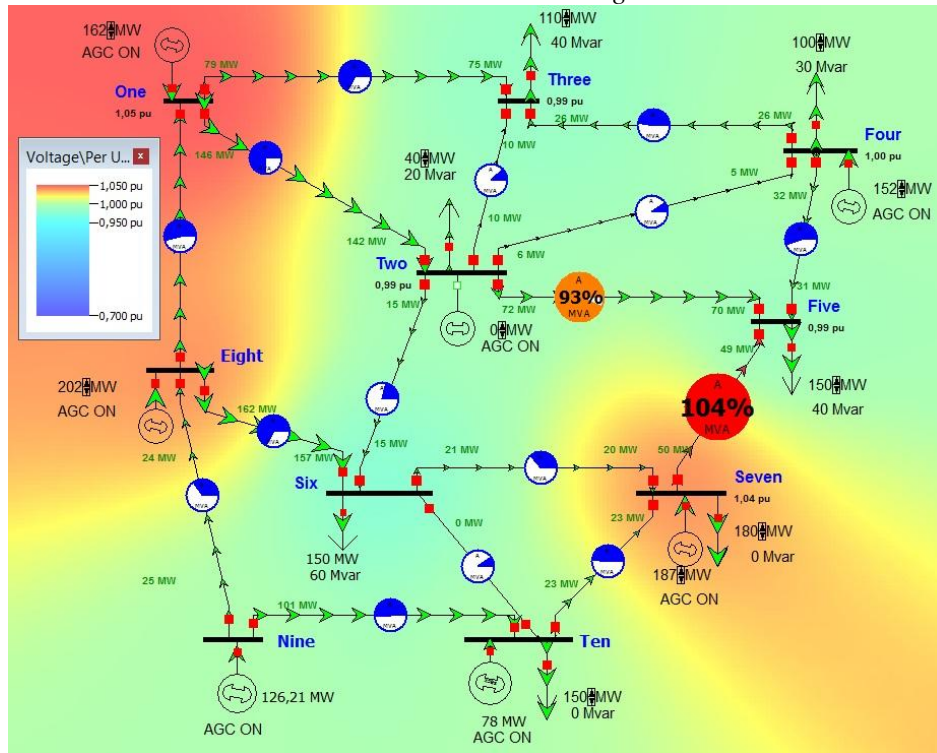


Tabla 101. Sobrecarga en la línea 7-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	142,3	32,1	145,9	200	73	3,9	17,14
One	Three	Closed	77,8	6	78	120	65	4,44	8,14
Eight	One	Closed	60,1	-7,1	60,5	120	50,9	1,01	8,45
Two	Three	Closed	9,9	-0,3	9,9	80	13	0,06	-3,74
Two	Four	Closed	5,5	-6,7	8,6	100	8,6	0,03	-3,88
Two	Five	Closed	70,4	-17,9	72,7	80	90,8	2,11	3,39
Two	Six	Closed	12,7	19,9	23,6	120	22,8	0,13	-4,47
Three	Four	Closed	-26,9	-38,7	47,1	100	47,1	0,22	-1,31
Four	Five	Closed	31,2	-7,6	32,1	60	53,6	0,8	-2,55
Seven	Five	Closed	52,7	66,4	84,8	80	105,9	1,38	0,02
Six	Seven	Closed	20,3	-33,1	38,8	110	35,3	1,13	-1,71
Eight	Six	Closed	154,6	39,2	159,5	250	63,8	4,7	47,03
Six	Ten	Closed	-7,9	-10,4	13	120	11,1	0	0,35
Ten	Seven	Closed	29,8	-27,4	40,5	70	57,8	1,21	-1,58
Eight	Nine	Closed	-15,3	31,1	34,7	120	28,9	0,33	1,67
Nine	Ten	Closed	88,9	1,4	88,9	200	44,4	3,95	27,64

Tabla 102. Salida de operación de la línea 7-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	146	52,6	155,1	200	77,6	4,43	20,44
One	Three	Closed	85,4	6,4	85,6	120	71,4	5,35	10,88
Eight	One	Closed	68,6	-6,9	68,9	120	58	1,32	10,98
Two	Three	Closed	13,2	-12,1	17,9	80	22,4	0,18	-3,29
Two	Four	Closed	10,6	-20,8	23,4	100	23,4	0,3	-2,99
Two	Five	Closed	109,2	30,2	113,3	80	141,6	5,48	13,82
Two	Six	Closed	-31,4	14,8	34,8	120	30,7	0,27	-3,88
Three	Four	Closed	-17	-53,3	56	100	56	0,31	-1,02
Four	Five	Closed	48,9	26,9	55,9	60	93,1	2,61	3,32
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-12,6	-27,5	30,2	110	27,5	0,68	-3,01
Eight	Six	Closed	151,8	44,8	158,3	250	63,3	4,63	46,31
Six	Ten	Closed	-21,9	-15,4	26,8	120	23,1	0	1,53
Ten	Seven	Closed	8,8	-21,8	23,5	70	33,6	0,36	-4,12
Eight	Nine	Closed	-21,1	32,5	38,7	120	32,3	0,42	2,08
Nine	Ten	Closed	82,2	0,3	82,2	200	41,1	3,38	23,66

Tabla 103. Salida de operación de la línea 2-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	127,2	53,7	138,1	200	69,1	3,53	15,03
One	Three	Closed	105,5	26,5	108,7	120	90,6	8,69	21,16
Eight	One	Closed	73,4	-6,6	73,7	120	62	1,5	12,54
Two	Three	Closed	51,7	5,5	52	80	65	1,74	1,61
Two	Four	Closed	58,6	0,9	58,6	100	58,6	2,19	2,95
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-26,5	12,3	29,2	120	26,1	0,2	-4,1
Three	Four	Closed	36,7	-30,8	47,9	100	47,9	0,26	-0,96
Four	Five	Closed	145,5	138,3	200,7	60	334,5	37,43	109,45
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-12,2	-27,8	30,4	110	27,6	0,68	-2,99
Eight	Six	Closed	148	44,3	154,5	250	61,8	4,41	44,12
Six	Ten	Closed	-20,9	-15,7	26,1	120	22,5	0	1,46
Ten	Seven	Closed	8,5	-21,7	23,3	70	33,3	0,35	-4,14
Eight	Nine	Closed	-22	32,7	39,5	120	32,9	0,43	2,16
Nine	Ten	Closed	81,1	0,2	81,1	200	40,5	3,29	23

Tabla 104. Salida de operación de la línea 4-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	91,3	32,5	96,9	200	48,5	1,75	4,19
One	Three	Closed	73,1	6,6	73,4	120	61,1	3,94	6,62
Eight	One	Closed	82,6	-6,1	82,8	120	69,7	1,9	15,84
Two	Three	Closed	33,9	-6,3	34,5	80	43,1	0,71	-1,81
Two	Four	Closed	33,1	-13,7	35,8	100	35,8	0,74	-1,75
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-17,4	28,4	33,3	120	30,8	0,25	-4,13
Three	Four	Closed	-7,7	-44,5	45,2	100	45,2	0,2	-1,37
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-10,9	-22,7	25,2	110	22,9	0,44	-3,79
Eight	Six	Closed	141,1	35,2	145,4	250	58,2	3,91	39,1
Six	Ten	Closed	-19,6	-8,7	21,4	120	18,2	0	0,95
Ten	Seven	Closed	6,9	-21,3	22,3	70	31,9	0,32	-4,25
Eight	Nine	Closed	-24,4	33,3	41,3	120	34,4	0,47	2,36
Nine	Ten	Closed	78,3	-0,2	78,3	200	39,2	3,07	21,46

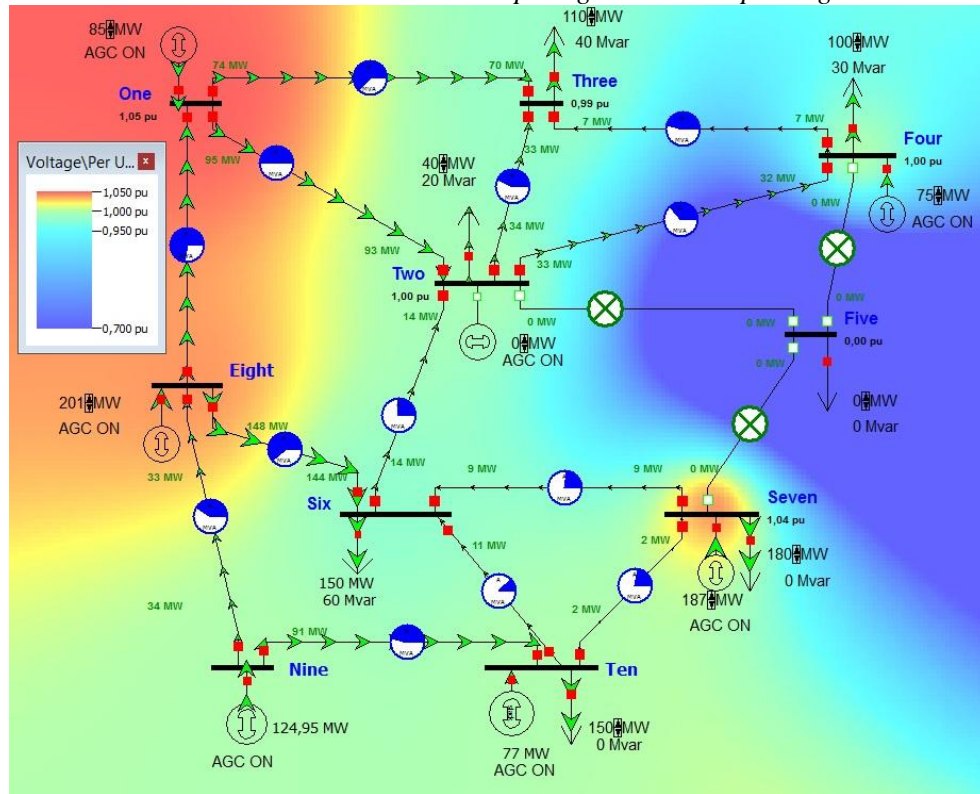
Cuando sale de operación la última línea producto del efecto en cascada el sistema vuelve a su funcionamiento normal, pero queda en estado de active Splitting, lo que ocasiona que la carga más crítica (carga número 5) se quede sin alimentación y aislada del sistema.

Tabla 105. Cargas del sistema.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	0	0	0	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Las tensiones con las que el sistema sigue operando después del active Splitting son las que se pueden observar en la ilustración número 42.

Ilustración 42. Contorno de tensiones en el active Splitting ocasionado por el generador 2.



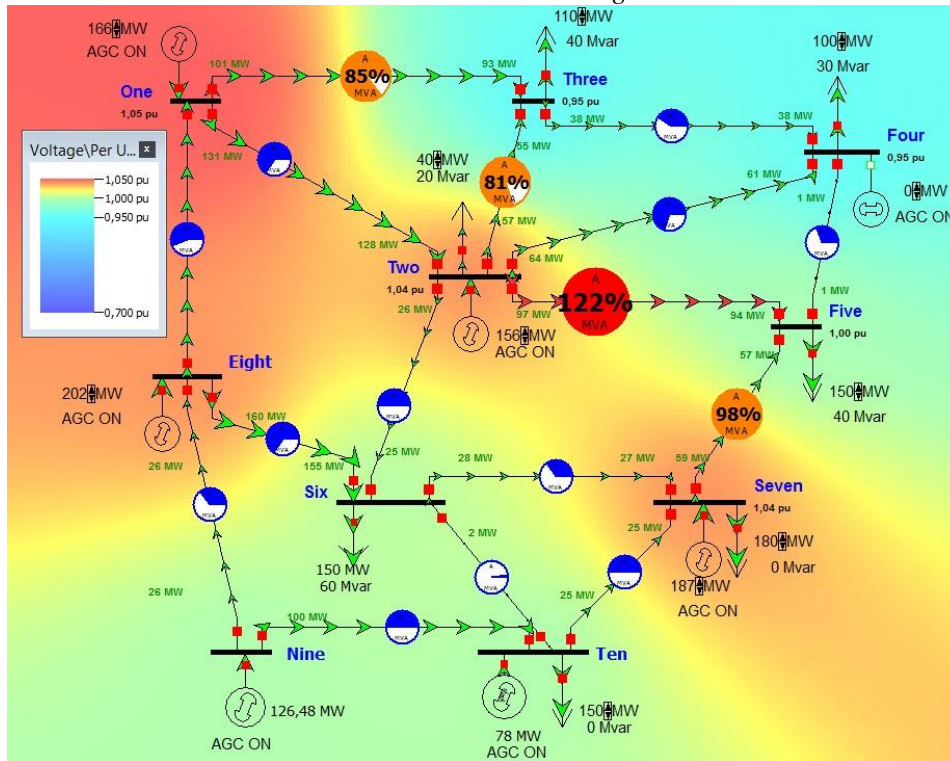
Prueba en el generador 4

Se procede a desconectar el generador número 4 del sistema para hacer seguimiento a la reacción que este evento produce.

Tabla 106. Desconexión del generador 4.

Name of Bus	Status	Gen MW	Gen Mvar	Set Volt	Min MW	Max MW	Min Mvar	Max Mvar
One	Closed	230,37	22,73	1,05	50	250	-200	200
Two	Closed	94,27	178,71	1,04	50	300	-200	200
Four	Open	0	0	1	50	200	-200	200
Seven	Closed	192,17	99,5	1,04	0	300	-200	200
Eight	Closed	198,96	49,82	1,04	150	300	-200	200
Nine	Closed	100,32	-27,29	1	0	200	-200	200
Ten	Closed	100,73	-2,95	1	0	1000	-9900	9900

Ilustración 43. Contorno de tensiones con la desconexión de generador 4.



La desconexión del generador número 4 del sistema ocasiona sobrecarga en 2 líneas, por operación de las protecciones sale la que está más sobrecarga, este suceso provoca un efecto en cascada, el cual se puede observar en las siguientes tablas.

Tabla 107. Sobrecarga en las líneas 2-5 y 7-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	167,9	-6,8	168,1	200	84	5,12	24,15
One	Three	Closed	112,9	16,1	114	120	95	9,5	23,48
Eight	One	Closed	51,2	-7,2	51,7	120	43,5	0,74	6,18
Two	Three	Closed	51,4	32,7	60,9	80	76,1	2,14	2,44
Two	Four	Closed	59,3	30,3	66,6	100	66,6	2,54	3,63
Two	Five	Closed	90,5	9,9	91,1	80	113,8	3,08	6,13
Two	Six	Closed	15,7	54,9	57,1	120	50,1	0,66	-3,24
Three	Four	Closed	42,6	-17,1	45,9	100	45,9	0,23	-1,13
Four	Five	Closed	-0,8	-19,3	19,3	60	32,2	0,26	-3,99
Seven	Five	Closed	64,9	51,4	82,8	80	103,5	1,31	-0,22
Six	Seven	Closed	25,3	-24,9	35,4	110	32,2	0,9	-2,51
Eight	Six	Closed	158,8	26,9	161,1	250	64,4	4,8	47,96
Six	Ten	Closed	-6,2	1,9	6,5	120	5,4	0	0,08

Ten	Seven	Closed	29,6	-27,4	40,3	70	57,6	1,2	-1,62
Eight	Nine	Closed	-11	30,2	32,1	120	26,8	0,29	1,43
Nine	Ten	Closed	89	1,4	89	200	44,5	3,96	27,73

Tabla 108. Salida d operación de la línea 2-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	157,4	-7	157,5	200	78,8	4,5	20,43
One	Three	Closed	119,8	19,7	121,4	120	101,2	10,79	27,38
Eight	One	Closed	45,3	-7,2	45,9	120	38,6	0,58	4,87
Two	Three	Closed	67,2	34,3	75,5	80	94,3	3,24	5,79
Two	Four	Closed	79,1	32,1	85,4	100	85,4	4,12	8,43
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	62,9	45,6	77,7	120	64,8	1,16	-1,72
Three	Four	Closed	63	-19,2	65,9	100	65,9	0,48	-0,32
Four	Five	Closed	37,5	-25,2	45,2	60	75,3	1,74	0,63
Seven	Five	Closed	117,8	72,5	138,3	80	172,9	3,6	6,73
Six	Seven	Closed	59,2	-33,1	67,9	110	61,7	3,55	5,45
Eight	Six	Closed	160,3	28,9	162,9	250	65,2	4,91	49,08
Six	Ten	Closed	8	0,3	8	120	6,7	0	0,13
Ten	Seven	Closed	52,7	-32,2	61,7	70	88,2	2,92	3,57
Eight	Nine	Closed	-6,5	29,1	29,8	120	24,9	0,25	1,24
Nine	Ten	Closed	96	2,8	96	200	48	4,61	32,28

Tabla 109. Salida de operación de la línea 7-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	142,9	53,6	152,6	200	76,3	4,29	19,61
One	Three	Closed	136,2	100,7	169,4	120	141,2	21,24	59,56
Eight	One	Closed	68,1	-6,9	68,4	120	57,6	1,3	10,82
Two	Three	Closed	94,8	91,7	131,9	80	164,9	11,32	30,97
Two	Four	Closed	111,9	108,2	155,6	100	155,6	15,71	44,25
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-31,9	14,1	34,9	120	30,7	0,27	-3,86
Three	Four	Closed	89,7	62,3	109,2	100	109,2	2,15	5,39
Four	Five	Closed	86,8	91,8	126,3	60	210,5	25,68	75,47
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-16	-26,5	31	110	28,2	0,72	-2,88
Eight	Six	Closed	149,3	44,6	155,8	250	62,3	4,49	44,89

Six	Ten	Closed	-21,4	-15,7	26,6	120	22,9	0	1,51
Ten	Seven	Closed	5	-20,7	21,3	70	30,4	0,28	-4,35
Eight	Nine	Closed	-18,5	31,9	36,9	120	30,7	0,38	1,89
Nine	Ten	Closed	80	0	80	200	40	3,2	22,42

Tabla 110. Salida de operación de la línea 4-5.

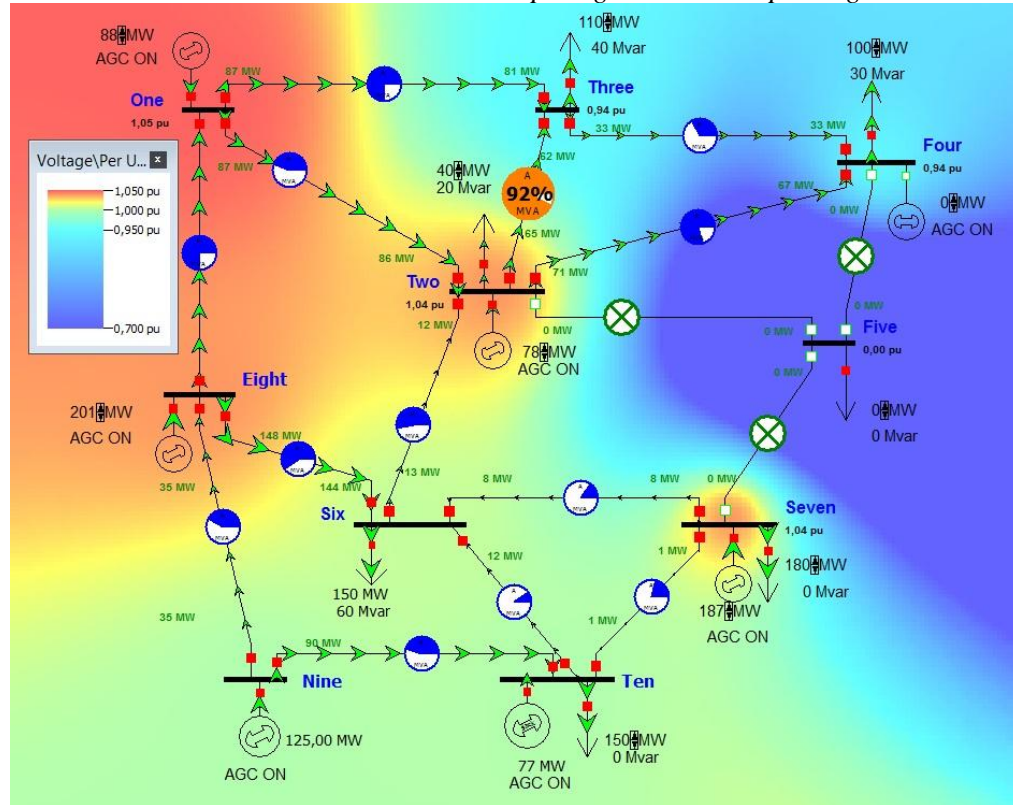
From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	101,8	-5,8	102	200	51	1,88	4,74
One	Three	Closed	91,9	22,4	94,6	120	78,8	6,59	14,8
Eight	One	Closed	78,7	-6,3	78,9	120	66,4	1,73	14,4
Two	Three	Closed	62,4	36	72	80	90,1	2,97	4,97
Two	Four	Closed	68,8	36,5	77,9	100	77,9	3,45	6,44
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-21,3	64,2	67,7	120	58,6	0,91	-2,5
Three	Four	Closed	34,8	-1,4	34,8	100	34,8	0,14	-1,36
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-13,4	-12,3	18,2	110	16,5	0,22	-4,58
Eight	Six	Closed	142	22,6	143,8	250	57,5	3,82	38,23
Six	Ten	Closed	-20,6	3,3	20,9	120	17,4	0	0,86
Ten	Seven	Closed	1,9	-19,7	19,8	70	28,3	0,24	-4,48
Eight	Nine	Closed	-21,9	32,7	39,4	120	32,8	0,43	2,15
Nine	Ten	Closed	76,3	-0,5	76,3	200	38,1	2,91	20,37

La salida de operación de la línea 4-5 deja el sistema en estado de active Splitting, consecuencia del efecto en cascada, se afecta únicamente a la carga número 5, siendo ésta, la más crítica para el sistema.

Tabla 111. Cargas del sistema.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	0	0	0	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Ilustración 44. Contorno de tensiones en el active Splitting ocasionador por el generador 4.



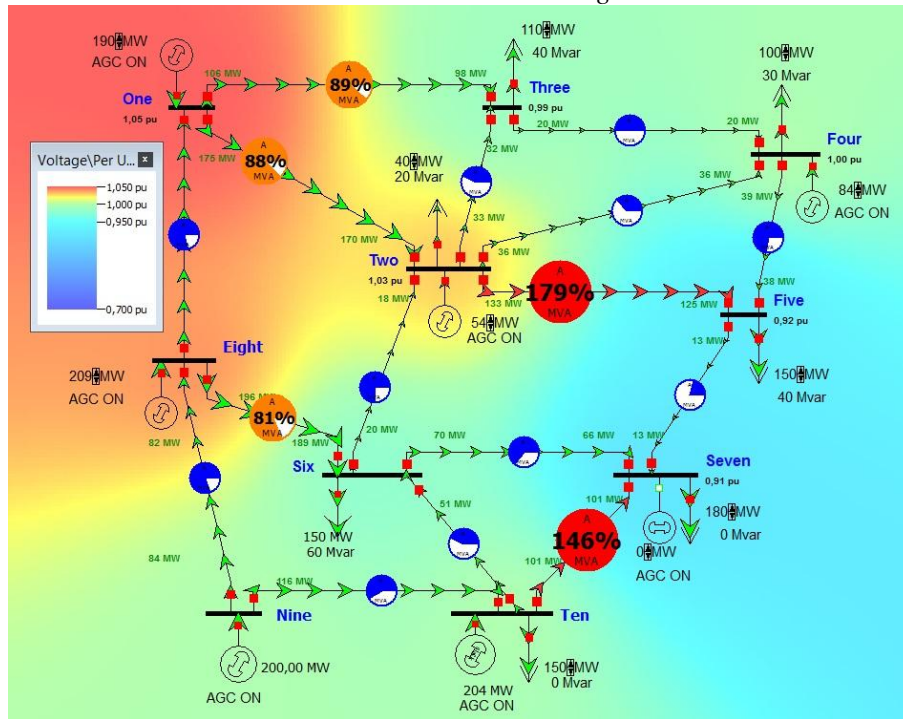
Prueba en el generador 7

Se procede a desconectar el generador número 7 del sistema para hacer seguimiento a la contingencia generada.

Tabla 112. Desconexión del generador 7.

Name of Bus	Status	Gen MW	Gen Mvar	Set Volt	Min MW	Max MW	Min Mvar	Max Mvar
One	Closed	154,18	28,3	1,05	50	250	-200	200
Two	Closed	87,4	200	1,04	50	300	-200	200
Four	Closed	83,47	79,78	1	50	200	-200	200
Seven	Open	0	0	1,04	0	300	-200	200
Eight	Closed	209,2	92,18	1,04	150	300	-200	200
Nine	Closed	200	-30,42	1	0	200	-200	200
Ten	Closed	203,36	60,96	1	0	1000	-9900	9900

Ilustración 45. Contorno de tensiones con la desconexión del generador 7.



Al desconectar el generador 7 del sistema se ocasiona una sobrecarga en las líneas 2-5 y 10-7 del sistema, por operación de las protecciones sale la que tiene la sobrecarga más alta. Este suceso genera un efecto en cascada con las líneas del sistema, en las siguientes tablas se observa la salida de las líneas ordenadamente. Se puede observar una depresión de tensión en el sistema cerca al nodo 7 en la ilustración 45, que resalta la ausencia del centro de generación en este nodo del sistema.

Tabla 113. Sobrecarga en las líneas 2-5 y 10-7.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	153,2	-1,1	153,2	200	76,6	4,26	19,03
One	Three	Closed	98,2	1,9	98,2	120	81,9	7,01	15,84
Eight	One	Closed	100	-4,4	100,1	120	84,2	2,78	23,14
Two	Three	Closed	36	11,8	37,9	80	47,4	0,84	-1,58
Two	Four	Closed	39,3	5	39,6	100	39,6	0,9	-1,45
Two	Five	Closed	134,8	54,5	145,4	80	181,7	7,99	21,07
Two	Six	Closed	-13,8	88,6	89,6	120	75,2	1,59	-0,3
Three	Four	Closed	16,4	-40,6	43,8	100	43,8	0,19	-1,42
Four	Five	Closed	38,1	17	41,7	60	69,5	1,46	-0,25
Seven	Five	Closed	-13,3	-13,9	19,2	80	24	0,08	-3,15
Six	Seven	Closed	70,2	8,2	70,7	110	64,3	4,17	8,01
Eight	Six	Closed	192,3	46	197,7	250	79,1	7,23	72,28
Six	Ten	Closed	-50,5	-5,6	50,9	120	43,1	0	5,35

Ten	Seven	Closed	110,6	11,2	111,1	70	158,8	9,93	25,2
Eight	Nine	Closed	-83,1	50,6	97,3	120	81,1	2,63	13,13
Nine	Ten	Closed	114,3	7,1	114,5	200	57,3	6,56	45,91

Tabla 114. Salida de operación de la línea 2-5

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	138,9	-7	139,1	200	69,5	3,5	14,46
One	Three	Closed	111,2	1	111,2	120	92,7	8,99	21,77
Eight	One	Closed	95,3	-4,9	95,5	120	80,3	2,53	21,06
Two	Three	Closed	62,7	9,4	63,4	80	79,2	2,25	2,64
Two	Four	Closed	72,8	1,1	72,8	100	72,8	2,95	4,67
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	50,5	112	122,9	120	102,4	2,91	3,69
Three	Four	Closed	52,7	-53,9	75,4	100	75,4	0,57	-0,27
Four	Five	Closed	108,6	69,4	128,8	60	214,7	13,56	36,72
Seven	Five	Closed	55,4	7,8	56	80	70	1,02	0,63
Six	Seven	Closed	119,5	46	128	110	116,4	14,29	39,01
Eight	Six	Closed	192,8	56,4	200,9	250	80,4	7,47	74,65
Six	Ten	Closed	-36,5	-15,9	39,8	120	34,4	0	3,41
Ten	Seven	Closed	152	62,2	164,2	70	234,6	21,83	61,43
Eight	Nine	Closed	-76,8	48,5	90,8	120	75,7	2,29	11,44
Nine	Ten	Closed	120,9	9	121,2	200	60,6	7,35	51,45

Tabla 115. Salida de operación de la línea 4-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	135,7	3,4	135,8	200	67,9	3,35	13,62
One	Three	Closed	88,2	3	88,3	120	73,6	5,67	11,81
Eight	One	Closed	92,7	-5,2	92,9	120	78,1	2,39	19,94
Two	Three	Closed	32,5	9,8	33,9	80	42,4	0,68	-2,03
Two	Four	Closed	33,5	3,6	33,7	100	33,7	0,66	-2,14
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	93,2	156,4	182	120	151,7	6,43	14,54
Three	Four	Closed	4,3	-37	37,2	100	37,2	0,13	-1,58
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Closed	100,4	49,3	111,8	80	139,8	8,6	24,81
Six	Seven	Closed	142,4	121,1	186,9	110	169,9	33,6	98,22
Eight	Six	Closed	190	80,8	206,4	250	82,6	7,88	78,79

Six	Ten	Closed	-23,5	-37,3	44,1	120	40	0	4,61
Ten	Seven	Closed	176,2	165,1	241,4	70	344,9	47,3	138,6
Eight	Nine	Closed	-70,7	46,5	84,7	120	70,6	1,99	9,94
Nine	Ten	Closed	127,3	11	127,7	200	63,9	8,16	57,11

Tabla 116. Salida de operación de la línea 10-7.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	112	23,6	114,5	200	57,2	2,41	8,11
One	Three	Closed	86,2	4,5	86,3	120	71,9	5,43	11,09
Eight	One	Closed	110,3	-3,1	110,4	120	92,9	3,38	28,17
Two	Three	Closed	39,7	-3,2	39,8	80	49,7	0,93	-1,16
Two	Four	Closed	41,9	-11,1	43,3	100	43,3	1,09	-0,75
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	38,1	209,8	213,2	120	177,7	9,21	23,19
Three	Four	Closed	9,5	-48,6	49,5	100	49,5	0,24	-1,25
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Closed	28,1	15,3	32	80	40	2,93	8,56
Six	Seven	Closed	135,1	201	242,2	110	220,2	62,6	185,73
Eight	Six	Closed	168,1	99,4	195,2	250	78,1	7,05	70,48
Six	Ten	Closed	-95,2	-45,5	105,5	120	100,9	0	29,33
Ten	Seven	Open	0	0	0	70	0	0	0
Eight	Nine	Closed	-71,9	46,9	85,8	120	71,5	2,04	10,22
Nine	Ten	Closed	71,6	-1,1	71,6	200	35,8	2,56	17,92

Tabla 117. Salida de operación de la línea 6-7.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	73,8	-3,9	73,9	200	36,9	0,99	-0,63
One	Three	Closed	70,2	4,7	70,3	120	58,6	3,61	5,62
Eight	One	Closed	86,1	-5,8	86,3	120	72,6	2,06	17,2
Two	Three	Closed	47,7	11,5	49,1	80	61,3	1,36	-0,04
Two	Four	Closed	48,6	6,6	49	100	49	1,35	-0,11
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-13,5	70,3	71,5	120	61,5	1,02	-2,15
Three	Four	Closed	2,9	-29,4	29,6	100	29,6	0,08	-1,73
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Closed	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Open	0	0	0	110	0	0	0

Eight	Six	Closed	135,9	24,2	138,1	250	55,2	3,53	35,26
Six	Ten	Closed	-32,1	1,4	32,1	120	26,7	0	2,06
Ten	Seven	Open	0	0	0	70	0	0	0
Eight	Nine	Closed	-21,3	32,5	38,9	120	32,4	0,42	2,1
Nine	Ten	Closed	66,4	-1,6	66,4	200	33,2	2,21	15,45

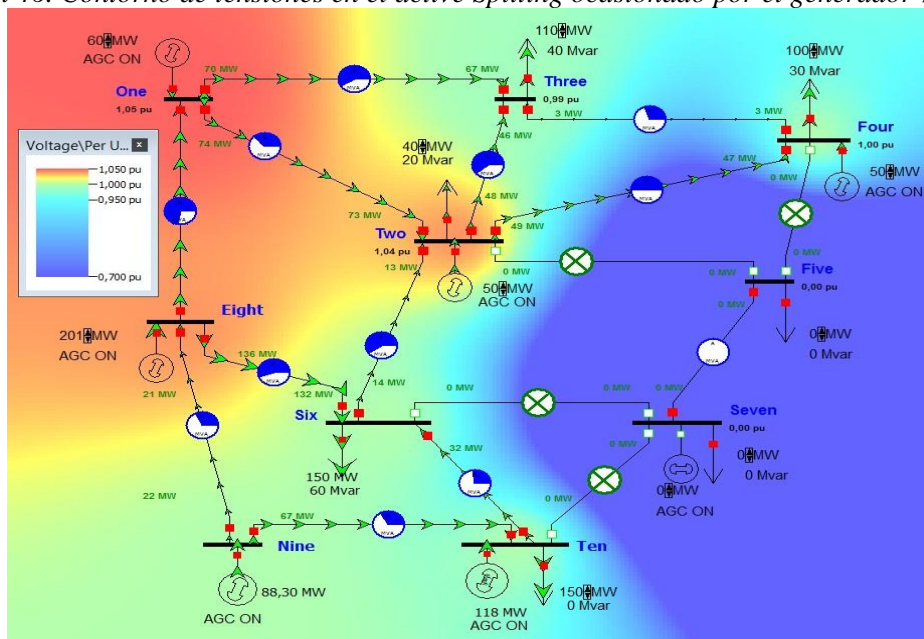
Cuando sale la línea 6-7 de operación, consecuencia del efecto en cascada, el sistema queda en estado de active Spliting, y continua su funcionamiento pero de manera dividida, la carga número 5 queda sin alimentación y aislada del sistema.

Tabla 118. Cargas del sistema.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	0	0	0	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Closed	0	0	0	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Las tensiones con las que sigue operando el sistema se pueden observar en el mapa de contorno de tensiones de la ilustración 46.

Ilustración 46. Contorno de tensiones en el active Spliting ocasionado por el generador 7.



Prueba en el generador 8

Se procede a desconectar el generador número 8 del sistema para hacer seguimiento a la contingencia generada.

Tabla 119. Desconexión del generador 8.

Name of Bus	Gen MW	Gen Mvar	Set Volt	Min MW	Max MW	Min Mvar	Max Mvar
One	109,57	30,45	1,05	50	250	-200	200
Two	99,64	121,6	1,04	50	300	-200	200
Four	99,64	27,06	1	50	200	-200	200
Seven	201,35	87,97	1,04	0	300	-200	200
Eight	0	0	1,04	150	300	-200	200
Nine	180,6	-10,59	1	0	200	-200	200
Ten	210,06	-14,03	1	0	1000	-9900	9900

Cuando se desconecta el generador número 8 del sistema se produce una sobrecarga en la línea 7-5, que se puede observar en la tabla 122. Cuando operan las protecciones de esta línea y sale de funcionamiento se producen nuevas sobrecargas en las diferentes líneas del sistema, ocasionando un efecto en cascada.

Ilustración 47. Contorno de tensiones con al desconexión del generador 8.

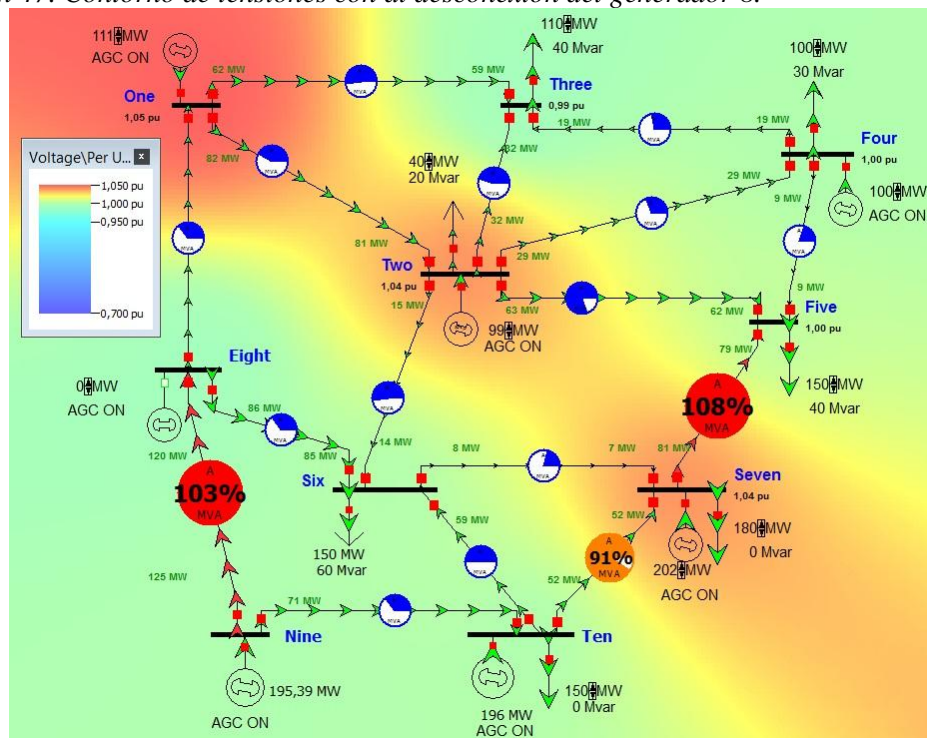


Tabla 120. Sobrecarga en la línea 7-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	79,6	-4,3	79,7	200	39,8	1,15	0,34
One	Three	Closed	61,2	6	61,5	120	51,2	2,77	3,1
Eight	One	Closed	31,7	-24,7	40,1	120	35,3	0,49	4,07
Two	Three	Closed	32,6	15,2	36	80	45,2	0,76	-1,86
Two	Four	Closed	29,3	11,7	31,6	100	32	0,58	-2,41
Two	Five	Closed	62,2	10,4	63,1	80	78,8	1,48	1,32
Two	Six	Closed	13,9	59,6	61,2	120	53,3	0,75	-2,95
Three	Four	Closed	-19,7	-20	28,1	100	28,1	0,08	-1,76
Four	Five	Closed	8,6	-7,1	11,1	60	18,5	0,08	-4,8
Seven	Five	Closed	82,3	33,5	88,8	80	111	1,49	0,28
Six	Seven	Closed	7,1	-20,8	22	110	20	0,31	-4,29
Eight	Six	Closed	82,1	-5	82,3	250	33,2	1,37	13,7
Six	Ten	Closed	-63,2	4,7	63,3	120	52,8	0	8
Ten	Seven	Closed	57,5	-33	66,3	70	94,8	3,39	4,98
Eight	Nine	Closed	-113,8	29,6	117,6	120	98,6	4,2	20,99
Nine	Ten	Closed	62,6	-1,9	62,7	200	31,3	1,96	13,74

Tabla 121. Salida de operación de la línea 7-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	86,2	-4,8	86,4	200	43,2	1,35	1,54
One	Three	Closed	69,2	4,8	69,4	120	57,8	3,52	5,34
Eight	One	Closed	44,6	-25,8	51,6	120	45,5	0,81	6,76
Two	Three	Closed	39,2	13,6	41,5	80	51,8	0,99	-1,17
Two	Four	Closed	38,4	9,2	39,5	100	39,5	0,89	-1,5
Two	Five	Closed	124,5	45,1	132,5	80	165,6	6,54	16,66
Two	Six	Closed	-55,5	85,6	102	120	85,4	2,01	0,82
Three	Four	Closed	-6,1	-25,8	26,6	100	26,6	0,07	-1,78
Four	Five	Closed	33	9,8	34,4	60	57,4	0,99	-1,76
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-43,2	-2,2	43,2	110	40,6	1,49	-0,74
Eight	Six	Closed	79	-6,2	79,2	250	32	1,28	12,76
Six	Ten	Closed	-86,6	8,1	87	120	72,5	0	15,11
Ten	Seven	Closed	24,2	-26,1	35,6	70	50,8	0,91	-2,47
Eight	Nine	Closed	-123,6	32	127,7	120	107,3	4,97	24,87
Nine	Ten	Closed	52,2	-2,6	52,3	200	26,1	1,37	9,56

Tabla 122. Salida de operación de la línea 2-5

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	67,3	-3,3	67,4	200	33,7	0,82	-1,62
One	Three	Closed	95,1	13,3	96	120	80	6,74	15,16
Eight	One	Closed	49,2	-25,9	55,6	120	49,1	0,94	7,86
Two	Three	Closed	85,2	19,4	87,4	80	109,2	4,28	8,83
Two	Four	Closed	96,5	15,5	97,7	100	97,7	5,34	11,97
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-50,9	84	98,2	120	82,4	1,87	0,4
Three	Four	Closed	59,2	-31,2	66,9	100	66,9	0,48	-0,43
Four	Five	Closed	154	142,8	210	60	350,1	38,3	111,97
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-42,8	-2,4	42,9	110	40,3	1,47	-0,81
Eight	Six	Closed	75,4	-6,4	75,7	250	30,6	1,17	11,66
Six	Ten	Closed	-85,7	7,9	86,1	120	71,7	0	14,8
Ten	Seven	Closed	23,8	-26	35,2	70	50,3	0,89	-2,52
Eight	Nine	Closed	-124,6	32,3	128,7	120	108,2	5,06	25,29
Nine	Ten	Closed	51,2	-2,6	51,2	200	25,6	1,31	9,18

Tabla 123. Salida de operación de la línea 4-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	48,3	-1,3	48,3	200	24,1	0,42	-4,01
One	Three	Closed	61,9	6,1	62,2	120	51,8	2,83	3,28
Eight	One	Closed	53,7	-25,9	59,6	120	52,6	1,09	9,04
Two	Three	Closed	51,9	10,3	53	80	66,2	1,58	0,62
Two	Four	Closed	52,2	5,7	52,5	100	52,5	1,55	0,48
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-46,3	82,3	94,4	120	79,4	1,73	-0,01
Three	Four	Closed	-0,6	-27,5	27,5	100	27,5	0,07	-1,77
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-42,5	-2,6	42,6	110	40	1,44	-0,88
Eight	Six	Closed	71,8	-6,7	72,1	250	29,1	1,06	10,58
Six	Ten	Closed	-84,8	7,6	85,2	120	71	0	14,49
Ten	Seven	Closed	23,5	-25,9	34,9	70	49,9	0,88	-2,57
Eight	Nine	Closed	-125,5	32,5	129,6	120	109	5,13	25,65
Nine	Ten	Closed	50	-2,7	50,1	200	25	1,25	8,78

Tabla 124. Salida de operación de la línea 8-9.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	15,8	2,9	16,1	200	9,1	0,05	-6,24
One	Three	Closed	51,4	8,1	52	120	43,3	2	0,78
Eight	One	Closed	11,4	-12,5	16,9	120	14,5	0,08	0,68
Two	Three	Closed	57,5	8,9	58,1	80	72,7	1,9	1,57
Two	Four	Closed	57	4,6	57,2	100	57,2	1,83	1,31
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-88,6	99,9	133,6	120	111,3	3,4	4,99
Three	Four	Closed	-5,1	-25,4	25,9	100	25,9	0,06	-1,8
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-76,6	14,4	77,9	110	74,2	4,91	9,53
Eight	Six	Closed	-11,4	12,5	16,9	250	6,8	0,05	0,55
Six	Ten	Closed	-176,9	32,5	179,9	120	149,9	0	64,65
Ten	Seven	Closed	63,2	-33,9	71,7	70	102,6	3,98	6,74
Eight	Nine	Open	0	0	0	120	0	0	0
Nine	Ten	Closed	189,9	40,1	194,1	200	97	18,83	131,83

Tabla 125. Salida de operación de la línea 6-10.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	17,5	2,8	17,7	200	9,8	0,06	-6,34
One	Three	Closed	53	8,2	53,6	120	44,7	2,07	0,89
Eight	One	Closed	13,2	-21,5	25,2	120	22	0,19	1,55
Two	Three	Closed	58,6	9,1	59,3	80	74,1	1,93	1,56
Two	Four	Closed	58,1	4,7	58,3	100	58,3	1,86	1,31
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-87,4	171,5	192,5	120	160,4	6,87	15,47
Three	Four	Closed	-5	-26,1	26,5	100	26,5	0,06	-1,84
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-199	106,7	225,8	110	221,1	43,52	125,46
Eight	Six	Closed	-13,2	21,5	25,2	250	10,1	0,12	1,24
Six	Ten	Open	0	0	0	120	0	0	0
Ten	Seven	Closed	280,8	-9,5	281	70	416,3	63,14	184,2
Eight	Nine	Open	0	0	0	120	0	0	0
Nine	Ten	Closed	189,9	40,1	194,1	200	97	18,83	131,83

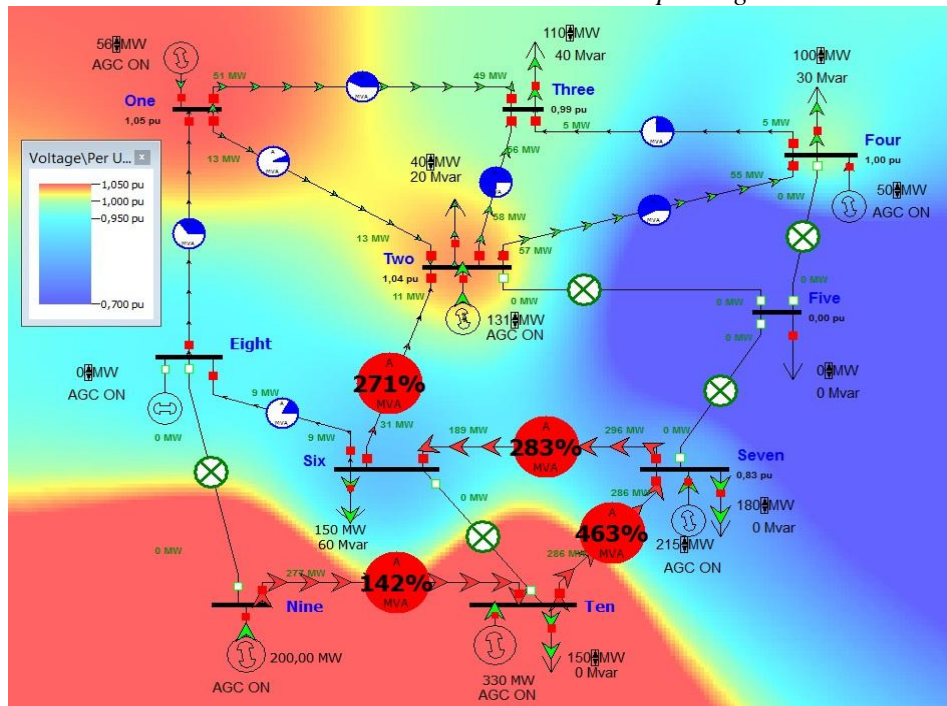
Quando sale la línea 6-10 de operación consecuencia del efecto en cascada el sistema sufre un blackout, diciendo así que el generador 8 es el más grande e importante del sistema, debido a lo crítica que es su salida, y a que el sistema sin él, no puede suplir la demanda de energía eléctrica solicitada. Las tensiones en el blackout son las de la tabla 128.

Tabla 126. Tensiones en el blackout.

Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
One	138	1,14247	157,661	-134,54			50	53,01
Two	138	1,13197	156,212	-135,45	40	20	50	317,83
Three	138	1,07984	149,017	-140,64	110	40		
Four	138	1,08834	150,191	-140,63	100	30	55,43	51,32
Five	138	0	0	0	0	0		
Six	138	0,99472	137,271	-129,98	150	60		
Seven	138	1,0693	147,564	-76,46	180	0	254,27	507,71
Eight	138	1,05989	146,264	-132,12			0	0
Nine	138	1	138	37,67			200	46,76
Ten	138	1	138	-4,91	150	0	434,2	219,74

Las tensiones en el blackout se pueden caracterizar de mejor manera observando el mapa de contorno de tensiones de la siguiente ilustración.

Ilustración 48. Contorno de tensiones en el blackout ocasionado por el generador 8.



Prueba en el generador 9

Se procede a desconectar el generador número 9 del sistema, para hacer seguimiento al efecto producido en el sistema.

Tabla 127. Desconexión del generador 9.

Name of Bus	Status	Gen MW	Gen Mvar	Set Volt	Min MW	Max MW	Min Mvar	Max Mvar
One	Closed	107,36	13,55	1,05	50	250	-200	200
Two	Closed	101,44	111,32	1,04	50	300	-200	200
Four	Closed	101,44	27,23	1	50	200	-200	200
Seven	Closed	194,94	84,92	1,04	0	300	-200	200
Eight	Closed	205,53	16,81	1,04	150	300	-200	200
Nine	Open	0	0	1	0	200	-200	200
Ten	Closed	185,88	-31,83	1	0	1000	-9900	9900

La desconexión del generador 9 no produce efectos negativos para el sistema, por lo que puede seguir operando normalmente. El generador 9 a pesar de tener mucha importancia para el sistema y su funcionamiento dinámico, se puede prescindir de su uso cuando el sistema está en un funcionamiento estable.

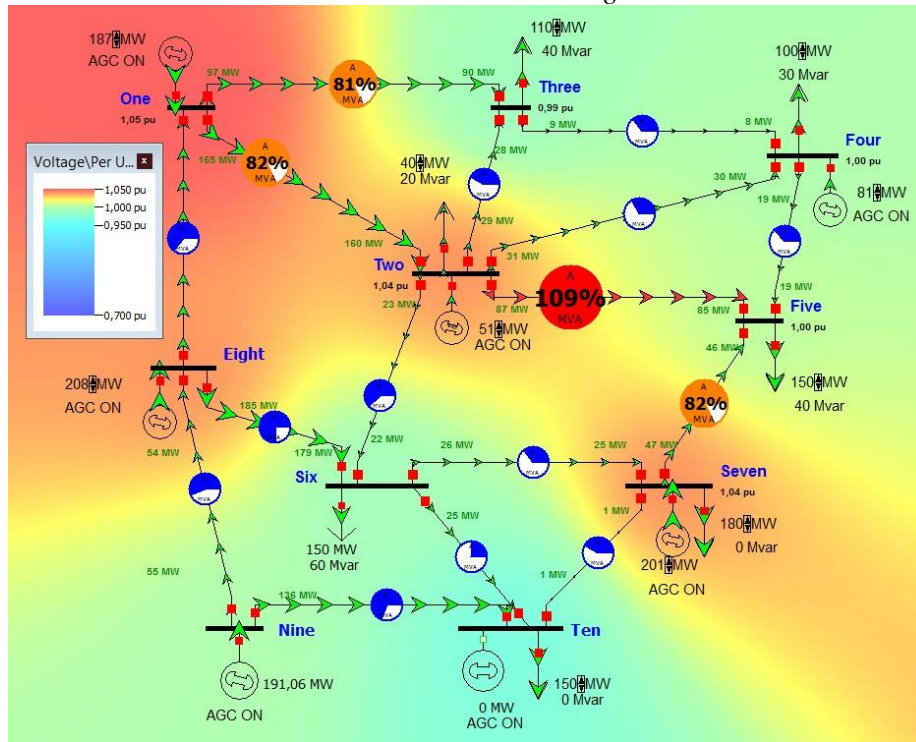
Prueba en el generador 10

Por último se procede a desconectar el generador 10 para hacer seguimiento a la contingencia producida.

Tabla 128. Desconexión del generador 10.

Name of Bus	Status	Gen MW	Gen Mvar	Set Volt	Min MW	Max MW	Min Mvar	Max Mvar
One	Closed	108,73	20,78	1,05	50	250	-200	200
Two	Closed	102,85	134,11	1,04	50	300	-200	200
Four	Closed	102,81	28,6	1	50	200	-200	200
Seven	Closed	201,76	99,49	1,04	0	300	-200	200
Eight	Closed	212,35	70,95	1,04	150	300	-200	200
Nine	Closed	184,7	-13,36	1	0	200	-200	200
Ten	Open	0	0	1	0	1000	-9900	9900

Ilustración 49. Contorno de tensiones con la desconexión del generador 10.



La desconexión del generador número 10 del sistema ocasiona una sobrecarga en la línea 2-5, la que por operación de las protecciones debe salir de funcionamiento. Este evento provoca en el sistema eléctrico un efecto en cascada con las líneas de transmisión. Los datos del efecto en cascada se pueden observar en las siguientes tablas.

Tabla 129. Sobrecarga en la línea 2-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	118,1	-6,5	118,3	200	59,2	2,53	8,65
One	Three	Closed	76,3	3,7	76,4	120	63,7	4,26	7,56
Eight	One	Closed	87,9	-5,6	88,1	120	74,1	2,15	17,93
Two	Three	Closed	29,7	16,3	33,9	80	43	0,68	-2,09
Two	Four	Closed	28,3	12	30,8	100	31,3	0,56	-2,49
Two	Five	Closed	88,1	4,6	88,2	80	110,3	2,88	5,52
Two	Six	Closed	32,3	66,1	73,5	120	62,4	1,07	-1,97
Three	Four	Closed	-8,9	-25,5	27	100	27	0,07	-1,78
Four	Five	Closed	21,6	-10,6	24,1	60	40,1	0,43	-3,74
Seven	Five	Closed	44,4	46	63,9	80	80,8	0,79	-1,8
Six	Seven	Closed	24,6	-28,4	37,6	110	34,2	1,03	-2,07
Eight	Six	Closed	176,2	35,9	179,8	250	71,9	5,98	59,79

Six	Ten	Closed	26,9	12,5	29,7	120	24,7	0	1,78
Ten	Seven	Closed	-0,3	-30,3	30,3	70	43,3	0,66	-3,07
Eight	Nine	Closed	-51,8	40,7	65,8	120	54,9	1,2	6,01
Nine	Ten	Closed	131,7	21,3	133,5	200	66,7	8,91	62,34

Tabla 130. Salida de operación de la línea 2-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	107,6	-6	107,7	200	53,9	2,1	6,05
One	Three	Closed	83,3	2,9	83,4	120	69,5	5,06	9,97
Eight	One	Closed	83,2	-6	83,4	120	70,1	1,93	16,07
Two	Three	Closed	44,9	12,5	46,6	80	58,3	1,24	-0,42
Two	Four	Closed	47,4	6,9	47,9	100	47,9	1,29	-0,29
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	77,3	59	97,3	120	81	1,81	0,27
Three	Four	Closed	11,9	-34,1	36,1	100	36,1	0,13	-1,6
Four	Five	Closed	61,6	-12,5	62,9	60	104,8	3,12	4,41
Seven	Five	Closed	93,9	59,8	111,3	80	139,1	2,34	2,91
Six	Seven	Closed	56,8	-36,5	67,5	110	61,7	3,58	5,58
Eight	Six	Closed	178,1	38,5	182,2	250	72,9	6,14	61,41
Six	Ten	Closed	40,7	12,3	42,6	120	35,5	0	3,69
Ten	Seven	Closed	19,8	-36,6	41,6	70	59,4	1,33	-1,05
Eight	Nine	Closed	-48,5	39,7	62,7	120	52,3	1,09	5,45
Nine	Ten	Closed	139,1	24,6	141,2	200	70,6	9,97	69,8

Tabla 131. Salida de operación de la línea 7-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	103	-5,8	103,2	200	51,6	1,93	5
One	Three	Closed	105,8	12,4	106,6	120	88,8	8,3	19,81
Eight	One	Closed	99,2	-4,5	99,3	120	83,5	2,73	22,77
Two	Three	Closed	78,5	20,8	81,3	80	101,6	3,72	7,13
Two	Four	Closed	90,4	16,4	91,9	100	91,9	4,73	10,15
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	-1,3	73,9	73,9	120	63,2	1,08	-1,93
Three	Four	Closed	62,4	-33,7	70,9	100	70,9	0,54	-0,25
Four	Five	Closed	154	142,8	210,1	60	350,1	38,35	111,95
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-2,8	-19,7	19,9	110	18,1	0,25	-4,45
Eight	Six	Closed	170,5	33,4	173,8	250	69,5	5,58	55,84

Six	Ten	Closed	15,4	13,1	20,2	120	16,8	0	0,82
Ten	Seven	Closed	-17,9	-24,4	30,3	70	43,3	0,69	-3
Eight	Nine	Closed	-57,5	42,4	71,4	120	59,5	1,41	7,07
Nine	Ten	Closed	124,7	18,9	126,1	200	63,1	7,95	55,68

Tabla 132. Salida de operación de línea 4-5.

From Name	To Name	Status	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
One	Two	Closed	84,6	-4,7	84,7	200	42,4	1,3	1,24
One	Three	Closed	73,3	4,2	73,4	120	61,2	3,93	6,58
Eight	One	Closed	103,5	-4	103,6	120	87,1	2,97	24,79
Two	Three	Closed	45,4	12,1	47	80	58,7	1,26	-0,36
Two	Four	Closed	46,3	7,1	46,9	100	46,9	1,24	-0,45
Two	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Two	Six	Closed	3,2	72	72,1	120	61,8	1,03	-2,09
Three	Four	Closed	3,5	-29,9	30,1	100	30,1	0,09	-1,72
Four	Five	Open	0	0	0	60	0	0	0
Seven	Five	Open	0	0	0	80	0	0	0
Six	Seven	Closed	-2,5	-19,7	19,9	110	18,1	0,25	-4,45
Eight	Six	Closed	166,8	32,5	169,9	250	68	5,34	53,39
Six	Ten	Closed	16,2	12,9	20,7	120	17,3	0	0,86
Ten	Seven	Closed	-18,2	-24,1	30,2	70	43,1	0,68	-3,02
Eight	Nine	Closed	-58,1	42,6	72	120	60	1,44	7,19
Nine	Ten	Closed	123,5	18,4	124,8	200	62,4	7,79	54,54

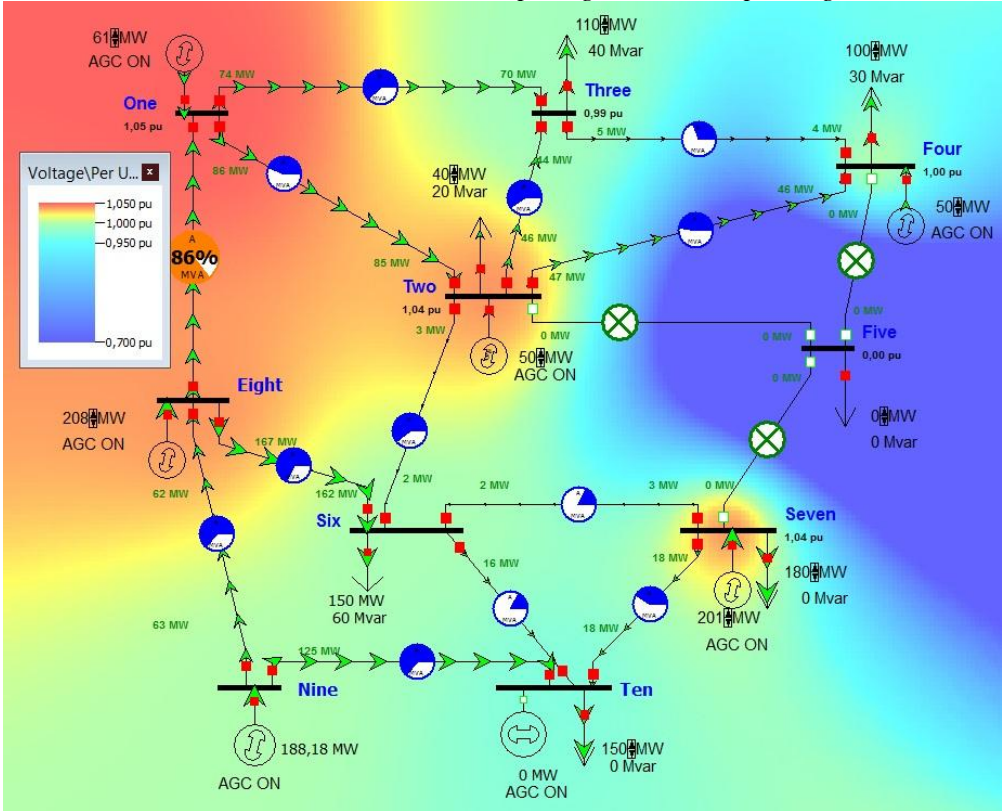
La salida de operación de la línea 4-5 consecuencia del efecto en cascada, deja el sistema en un estado de active Splitting, dejando el nodo número 5 aislado del sistema, y la carga número 5 sin alimentación, siendo ésta la más crítica para los eventos que ocurren en el sistema eléctrico de potencia.

Tabla 133. Cargas del sistema.

Name of Bus	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
Two	Closed	40	20	44,72	40	20
Three	Closed	110	40	117,05	110	40
Four	Closed	100	30	104,4	100	30
Five	Closed	0	0	0	150	40
Six	Closed	150	60	161,55	150	60
Seven	Closed	180	0	180	180	0
Ten	Closed	150	0	150	150	0

Las tensiones con las que el sistema continua operando en el active Spliting son las que se observan en la siguiente ilustración.

Ilustración 50. Contorno de tensiones en el active Spliting ocasionado por el generador 10.



4.3. SOLUCIONES PARA LOS CASOS DE CONTINGENCIAS MÁS CRÍTICAS

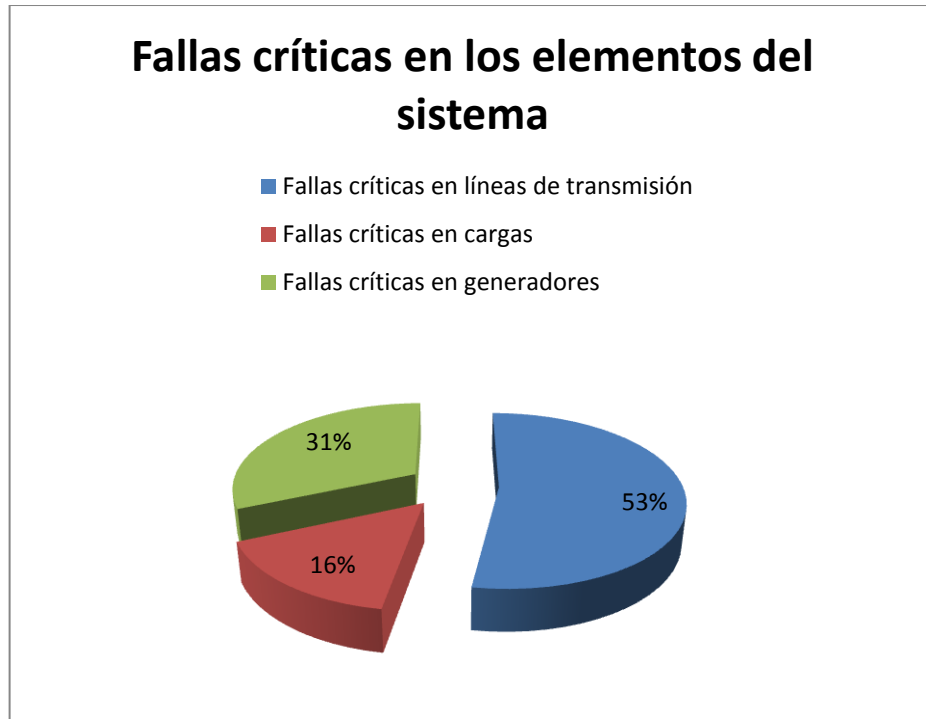
En este numeral se plantean las soluciones y las medidas de seguridad que se deben tomar para las contingencias más críticas, es decir, las que ocasionan blackout y active Spliting, es importante plantearlas para que se puedan evitar los efectos en cascada con las líneas de transmisión y el deslastre de carga en el sistema, debido a que una gran carga representa un gran centro de consumo, sean grandes fábricas o grandes ciudades, para las cuales es esencial el suministro ininterrumpido de energía eléctrica.

Tabla 134. Fallas críticas en los elementos del sistema.

Fallas críticas en las líneas de transmisión	Fallas críticas en las cargas del sistema	Fallas críticas en los generadores
10 de 16	3 de 7	6 de 7

Con la anterior tabla se da la referencia de que en las pruebas de contingencias n-1, un 62.5% de las líneas presentaron un estado grave para el sistema, 28% de las cargas y 71% de los generadores cuando fueron retirados de operación. Para entender mejor la relación de los datos se puede observar la ilustración 12.

Ilustración 51. Fallas críticas presentadas por los elementos del sistema en el análisis de contingencias n-1.



4.3.1. Solución a las contingencias en líneas de transmisión.

La mayoría de las líneas de transmisión son críticas para el sistema y la desconexión de ellas genera estados graves para el sistema en el 62.5% de las veces.

Caso 1: desconexión de la línea 1-2

Cuando la línea 1 – 2 sale de operación se debe hacer un re despacho de generación, bajando solo el generador 1 hasta 80 MW; esto solucionara el estado de contingencia y evitará el blackout del sistema.

Caso 2: desconexión de la línea 1-3

Cuando la línea 1 – 3 sale de operación, se debe hacer un re despacho de generación, bajando la potencia generada del generador 1 hasta su nivel mínimo (50 MW), y bajando la potencia generada del generador 2 hasta 90 MW; esto evitará el blackout del sistema.

Caso 3: desconexión de la línea 2-4

Cuando la línea 2 – 4 sale de operación se debe hacer un re despacho de generación, bajando la potencia generada del generador 4 hasta 130 MW; esto evitará el active Splitting.

Caso 4: desconexión de la línea 2-5

La línea 2 – 5 es una línea crítica para el sistema, debido a que alimenta una carga considerablemente grande, cuando esta línea sale de operación el estado del sistema puede ser más crítico, y es necesario hacer un re despacho de los generadores 8 y 4, subiendo el generador 8 hasta su máxima potencia generada (300 MW), y el 4 hasta 128 MW; además de esto es necesario hacer un racionamiento técnico, quitando a las cargas: 4 el 20% de su energía, 3 el 27 % de su energía, y por último a la carga 5 quitándole el 28% de su energía. Los anteriores procesos evitaban el active Splitting.

Caso 5: desconexión de la línea 2-6

Cuando la línea 2 – 6 sale de operación se debe hacer un re despacho de los generadores 4 y 8, bajando la potencia generada del generador 8 hasta 150 MW y la potencia generada del generador 4 hasta 140 MW, esto evitará el estado de contingencia.

Caso 6: desconexión de la línea 4-5

Cuando sale la línea 4 – 5 de operación, se debe hacer un re despacho de generación de los generadores 8 y 10, bajando la potencia generada del generador 8 hasta 150 MW y la potencia generada del generador 10 hasta 80 MW, además de esto, como la carga 5 es muy grande para el sistema, es necesario hacerle un racionamiento técnico de 7.7% de su energía, para brindar una correcta solución al sistema.

Caso 7: desconexión de la línea 7-5

La línea 7 – 5 es una línea crítica para el sistema, cuando sale de operación se deben hacer varios cambios en el sistema, es necesario hacer un re despacho del generador 4, aumentando su potencia generada hasta 200 MW, un racionamiento técnico de un 22% en

la carga 5, 30% en la carga 4 y 20% en la carga 3; adicionalmente se debe sacar de operación la línea 1 – 2. Así se garantiza que se evitará el active Splitting.

Caso 8: desconexión de la línea 6-7

Cuando la línea 6 – 7 sale de operación se debe hacer un re despacho del generador 4, aumentando su potencia generada hasta 180 MW; de esta manera se evitará el estado de contingencia.

Caso 9: desconexión de la línea 8-6

Cuando la línea 8 – 6 sale del sistema es necesario hacer un re despacho de generación para evitar el estado de contingencia, subiendo la potencia generada de los generadores 4 (hasta 200 MW) y 10 (hasta 160 MW).

Caso 10: desconexión de la línea 9-10

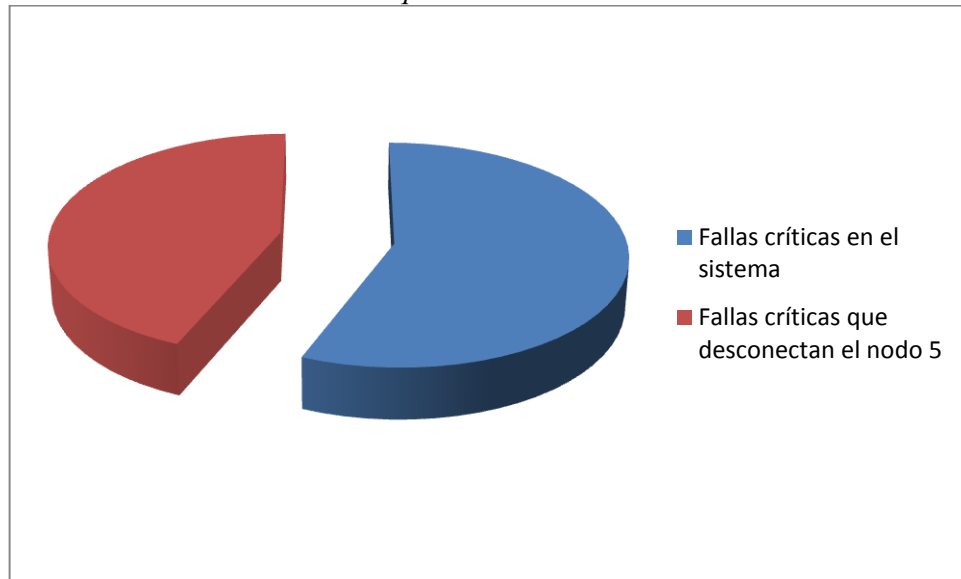
Cuando sale de operación la línea 9 – 10 es necesario hacer un re despacho de generación , bajando la potencia generada del generador 8 hasta 187 MW, y aumentando la potencia generada del generador 4 hasta 200 MW, adicionalmente se debe sacar de operación la línea 7 – 10. De esta manera se garantizará la solución dl estado de contingencia.

4.3.2. Solución a las contingencias en las cargas

Cuando salen de operación las cargas no es un evento tan grave en la mayor parte de las veces, ya que solo el 42% de las cargas generan un estado crítico en el sistema cuando son desconectadas.

La carga del nodo 5, es decir, la carga número 5, es el elemento más crítico del sistema, aunque no genere reacciones negativas del sistema cuando es retirada, por ser una gran carga, todos los eventos que generan el estado de active Splitting al sistema, terminan con la desconexión del nodo 5, aislándolo totalmente del sistema, como consecuencia de esto la carga 5 queda sin alimentación. Este suceso es una reacción grave debido a que la carga número 5 es para el sistema un gran centro de consumo, por lo tanto, la importancia de un suministro de energía eléctrica sin interrupciones es suma importancia para esta misma. El 77% de las fallas críticas deja aisla y sin alimentación el nodo número 5, para que se interprete mejor la relación se puede observar la ilustración. 13.

Ilustración 52. Fallas críticas del sistema que desconectan el nodo 5.



Caso 1: desconexión de la carga 2

Cuando la carga 2 sale de operación se debe hacer un re despacho de generación del generador 4, aumentando su potencia generada hasta 110 MW, de esta manera se evitará el estado de contingencia.

Caso 2: desconexión de la carga 6

Cuando se desconecta la carga número 6 del sistema es necesario hacer un re despacho de generación, subiendo el generador 8 a 150 MW y el generador 4 hasta 200MW, además de esto, es necesario para evitar el active Splitting, hacer un racionamiento técnico de 10 MW en la carga número 5.

Caso 3: desconexión del generador 7

Cuando la carga 7 sale de operación se debe hacer un re despacho del generador 7, bajando su potencia generada hasta 40 MW. De esta manera se evitará el estado de contingencia.

4.3.3. Solución a las contingencias en los generadores

La salida de operación de los generadores es un evento de suma importancia para el sistema, ya que si están programados en la generación del sistema eléctrico su potencia eléctrica inyectada es de gran vitalidad para abastecer la demanda. El 85% de los generadores del sistema ocasionan un estado crítico cuando salen de operación.

Caso 1: desconexión del generador 1

Cuando el generador 2 sale de operación se debe hacer un re despacho de generación, disminuyendo la potencia generada del generador 2 hasta 130 MW, de esta manera se soluciona el estado de contingencia del sistema.

Caso 2: desconexión del generador 2

Cuando el generador 2 sale de operación es necesario hacer un re despacho de generación, bajando la potencia generada del generador 7 hasta 140 MW y aumentando la potencia generada del generador 4 hasta 200 MW, adicionalmente se debe sacar de operación la línea 2 – 3 para garantizar la solución al estado de contingencia.

Caso 3: desconexión del generador 4

Cuando el generador 4 sale de operación se debe hacer un racionamiento técnico del 13% en la carga 5 y 20% en la carga 4, así se equilibrará nuevamente el sistema y se evitara el estado de contingencia.

Caso 4: desconexión del generador 7

Cuando el generador 7 sale de operación se debe hacer un re despacho de generación, aumentando la potencia del generador 4 hasta 200 MW, y disminuyendo la potencia del generador 8 hasta 150 –MW, adicionalmente se debe hacer un racionamiento técnico en las cargas 5 (33%), 7(27%), 6 (20%). De esta manera se solucionará el active Splitting.

Caso 5: desconexión del generador 8

Cuando se desconecta el generador 8, es necesario subir la generación en el nodo 4 a 200 MW y hacer un racionamiento técnico de 10 MW en las cargas 5 y 6 cada una, de esta manera se evita el blackout del sistema.

Caso 6: desconexión del generador 10

Cuando sales de operación el generador 10, se debe hacer un re despacho del generador 4, aumentando su potencia generada hasta 170 MW, de esta manera se evitará el estado de contingencia en el sistema.

CAPÍTULO V:

CONCLUSIONES

- Los análisis de colapsos son importantes para todos los sistemas eléctricos de potencia, ya que todos los centros de consumo requieren que el suministro de energía eléctrica sea prácticamente ininterrumpido. Cuando se hace un análisis de colapsos, se puede definir claramente cuáles son las líneas y los elementos críticos para el sistema, y de ésta manera tomar una estrategia de seguridad preventiva y evitar cualquier tipo de apagón o colapso.
- Los generadores son los elementos más delicados del sistema, ya que si se programa y se despacha toda la generación necesaria para abastecer la demanda eléctrica, la ausencia de cualquiera de ellos evita que el suministro sea el requerido, y genera un desbalance en los demás generadores que puede llegar a sobrecargar las líneas de transmisión.
- Para dar solución a los estados críticos del sistema es necesario hacer una combinación de estrategias de seguridad, como hacer un re despacho de generación para tratar de abastecer las demandas, y si es necesario, hacer un racionamiento técnico en las cargas más grandes del sistema, racionando estratégicamente pequeñas cantidades de energía en diversas cargas, para poder llevar el sistema nuevamente a un estado estable y sacarlo del peligro del blackout.
- Es necesario que el sistema eléctrico se expanda a medida que la carga va aumentando para poder abastecerlo sin tener que recurrir a estrategias que puedan poner en riesgo la seguridad misma del sistema de potencia, es necesaria la construcción de nuevas líneas de transmisión, centros de generación y subestaciones eléctricas para garantizar que el sistema tiene una alta fiabilidad.
- Las fallas cuando se produce una contingencia no siempre son graves inmediatamente, es decir, lo que agrava la contingencia de cualquier elemento es que el sistema está interconectado, y diversos eventos pueden ocasionar un efecto en cascada, llevándolo al colapso o a un estado dividido.
- La ausencia de generadores en los nodos, es decir, cuando se desconecta un generador de un nodo de generación, causa una depresión o baja en la tensión, que puede ser breve o notoria, dependiendo de la potencia que la máquina estuviera entregando.
- Cuando se trata de evitar los estados críticos y prevenir el efecto en cascada en la primera contingencia, es recomendable empezar con un re despacho de generación, como primera opción, es la manera más simple y menos drástica de compensar la diferencia entre generación y demanda del sistema eléctrico de potencia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] PowerWorld Corporation, *PowerWorld Simulator*, Champaign, 2015.
- [2] J. F. ROBLEDO MONTEALEGRE, «Análisis de colapsos en sistemas eléctricos de potencia,» Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2014.
- [3] R. CASTELLANOS BUSTAMANTE, «Determinación de límites de transmisión en sistemas eléctricos de potencia,» *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. XV, n° 2, pp. 271-286, 2014.
- [4] S. M. TÉLLEZ GUTIÉRREZ, «Comportamiento de conductores eléctricos usados en líneas de transmisión ante esfuerzos electromecánicos y térmicos combinados,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2011.
- [5] A. H. ESCOBAR ZULUAGA y L. A. GALLEGO, «Análisis estático de contingencias de potencia activa en sistemas eléctricos de potencia,» *Scientia et Technica*, vol. X, n° 25, 2004.
- [6] A. F. VILLA PANESSO y J. M. HOLGUÍN QUIRAMA, «Aplicación de proyección de demanda y estudio de la cargabilidad en el sistema eléctrico de potencia de la ciudad de Pereira,» Pereira, 2008.
- [7] R. E. SALAO PAREDES, J. F. MASACHE MASACHE y C. MERA GENCÓN, «Análisis de contingencia del sistema nacional interconectado,» Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2009.
- [8] P. DUSAN, B. GÜNTHER, R. DIETMAR, T. ERWIN y E. s. P. t. d. SIEMENS AG, «Global balckouts - Lesons learned,» Siemens, Milan, 2005.
- [9] F. M. GONZALES LONGATT, «Introducción a los sistemas de potencia,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.giaelec.org/fglongatt/SP.htm>. [Último acceso: 17

Noviembre 2014].

- [10] «WIKIPEDIA,» 29 12 2014. [En línea]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_Newton. [Último acceso: 19 01 2015].
- [11] J. H. MEJÍA, Artist, *Fotografía*. [Art]. ISA, 2004.
- [12] BL, «Un gigantesco apagón hace colapsar la ciudad de Buenos Aires,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.todanoticia.com>. [Último acceso: 19 Noviembre 2014].
- [13] P. LEDESMA, «Open Course Ware,» 25 9 2008. [En línea]. Available: http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/operacion-y-control-de-sistemas-electricos/II_OCSE_RT/node19.html. [Último acceso: 01 06 2015].
- [14] CONSTRUCTORA ROGERS, «Subestación eléctrica de Gamboa,» Ciudad de Panamá.
- [15] WikiPedia, «Apagones eléctricos,» 16 02 2010. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Apagones_el%C3%A9ctricos. [Último acceso: 15 05 2015].
- [16] ALLIANZ, «Open knowledge,» 2014. [En línea]. Available: <http://knowledge.allianz.com>. [Último acceso: 19 Noviembre 2014].
- [17] F. M. ECHAVARREN CEREZO, E. LOBATO MIGUELES, L. ROUCO RODRÍGUEZ y J. M. RODRÍGUEZ GARCÍA, «El colapso de tensión: causas y soluciones,» Universidad Pontificia Comillas, Madrid, 2006.
- [18] P. VALERO ESPARZA, «Comportamiento en sistemas de potencia ante el colapso de voltaje,» Universidad autónoma Nuevo León, Nuevo León, 2001.
- [19] A. H. ESCOAR ZULUAGA, *Curso básico de análisis de sistemas eléctricos de*

potencia, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2014.

- [20] A. GIUSTO y R. MARKARIÁN, «Estabilidad y control de sistemas eléctricos de potencia,» IIE, Cuernavaca, 2001.